

(19)日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開平11-212043

(43)公開日 平成11年(1999)8月6日

(51)Int.Cl.⁹

G 0 2 F 1/09

識別記号

5 0 5

F I

G 0 2 F 1/09

5 0 5

審査請求 未請求 請求項の数35 O L (全 19 頁)

(21)出願番号

特願平10-10144

(22)出願日

平成10年(1998)1月22日

(71)出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号

(72)発明者 福島 暢洋

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内

(74)代理人 弁理士 松本 昂

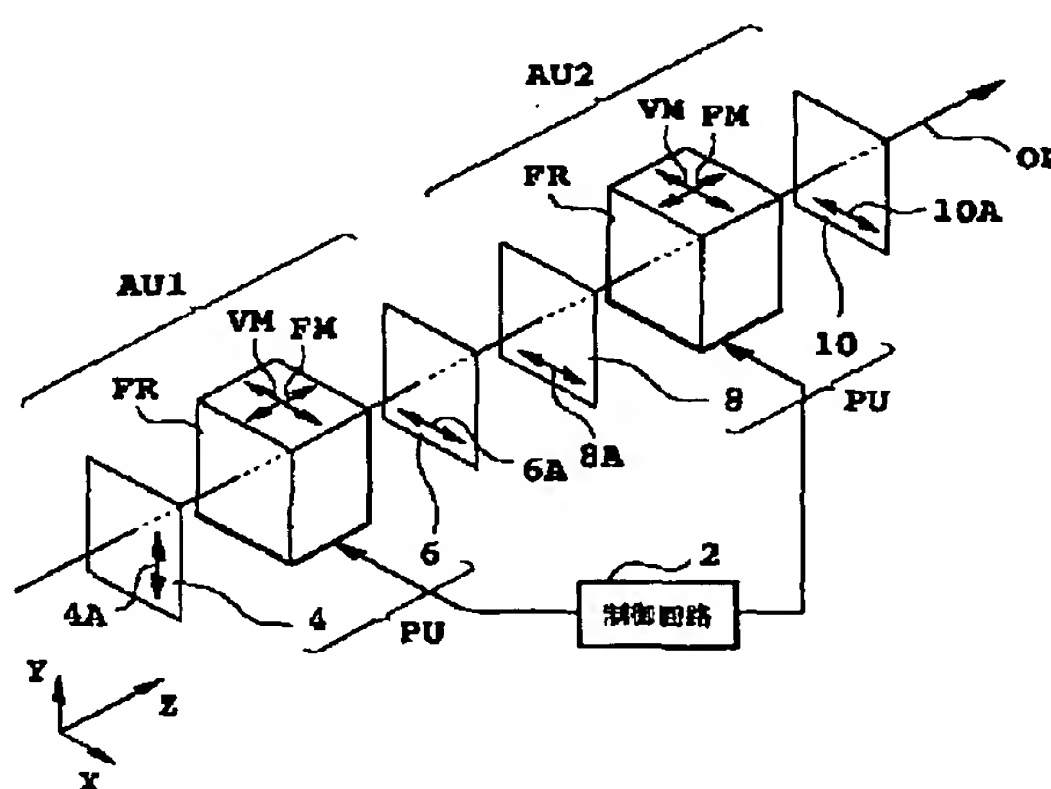
(54)【発明の名称】 光アッテネータ並びに該光アッテネータを備えたシステム、光増幅器及び端局装置

(57)【要約】

【課題】 本発明は2つのファラデー回転子を備えた光アッテネータに関し、減衰の波長特性が平坦な光アッテネータの提供を主な課題としている。

【解決手段】 カスケード接続された2つのアッテネータユニットAU1、AU2と、これらに接続される制御回路2とから光アッテネータを構成し、各アッテネータユニットを、ファラデー回転角が波長に依存するファラデー回転子FRと、ファラデー回転角によって決定される減衰が生じるようにするための偏光ユニットPUとから構成し、一方のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性が他方のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性によって相殺されるようにする。

光アッテネータの第1実施形態を示す図



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 光路上でカスケード接続された第 1 及び第 2 のアッテネータユニットと、
該第 1 及び第 2 のアッテネータユニットに接続される制御回路とを備え、

上記第 1 及び第 2 のアッテネータユニットの各々は、上記光路上に配置され波長の関数として与えられるファラデー回転角を生じさせるためのファラデー回転子と、上記ファラデー回転角によって決定される減衰を上記光路について生じさせるための偏光手段とを含み、

上記制御回路は、上記第 1 のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性が上記第 2 のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性によって実質的に相殺されるように上記各ファラデー回転角を制御する手段を含む光アッテネータ。

【請求項 2】 請求項 1 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 のアッテネータユニットの偏光手段は、上記第 1 のアッテネータユニットのファラデー回転子を挟むように上記光路上に設けられる第 1 及び第 2 の偏光子からなり、

上記第 2 のアッテネータユニットの偏光手段は、上記第 2 のアッテネータユニットのファラデー回転子を挟むように上記光路上に設けられる第 3 及び第 4 の偏光子からなり、

上記第 1 乃至第 4 の偏光子の各々は通過する偏光の偏波面を決定する軸を有している光アッテネータ。

【請求項 3】 請求項 2 に記載の光アッテネータであって、

上記各ファラデー回転子は、上記光路が通過するように設けられる磁気光学結晶と、与えられた電流に応じた可変磁界を上記磁気光学結晶に印加するための電磁石とを含む光アッテネータ。

【請求項 4】 請求項 3 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 のアッテネータユニットは上記与えられた電流が増大するのに従って上記第 1 のアッテネータユニットによる減衰が増大するように設けられ、

上記第 2 のアッテネータユニットは上記与えられた電流が増大するのに従って上記第 2 のアッテネータユニットによる減衰が減少するように設けられる光アッテネータ。

【請求項 5】 請求項 3 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 及び第 2 の偏光子の軸は互いに直交しており、上記第 3 及び第 4 の偏光子の軸は互いに平行であり、上記各電磁石により印加される各可変磁界は上記光路に対して実質的に垂直であり、

上記各ファラデー回転子は、上記与えられた電流が零であるときに上記各ファラデー回転角が実質的に 90° に

なるように上記各磁気光学結晶に固定磁界を印加するための永久磁石を更に含む光アッテネータ。

【請求項 6】 請求項 3 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 及び第 2 の偏光子の軸は互いに直交しており、上記第 3 及び第 4 の偏光子の軸は互いに直交しており、上記第 1 のアッテネータユニットの電磁石により印加される磁界は上記光路に対して実質的に垂直であり、

10 上記第 1 のアッテネータユニットのファラデー回転子は、上記与えられた電流が零であるときに上記ファラデー回転角が実質的に 90° になるように上記磁気光学結晶に固定磁界を印加するための永久磁石を更に含み、
上記第 2 のアッテネータユニットの電磁石により印加される磁界は上記光路に対して実質的に平行である光アッテネータ。

【請求項 7】 請求項 1 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 のアッテネータユニットの偏光手段は、上記第 1 のアッテネータユニットのファラデー回転子を挟むように設けられる第 1 及び第 2 の複屈折結晶を含み、

20 上記第 2 のアッテネータユニットの偏光手段は、上記第 2 のアッテネータユニットのファラデー回転子を挟むように設けられる第 3 及び第 4 の複屈折結晶を含み、
上記光路は上記第 1 乃至第 4 の複屈折結晶の各々について定義される常光線及び異常光線によって提供され、

上記光路上に光を供給するための第 1 の光ファイバと、
上記各ファラデー回転角に応じた結合効率で上記第 1 の光ファイバに光学的に結合される第 2 の光ファイバとを更に備えた光アッテネータ。

30 【請求項 8】 請求項 7 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 乃至第 4 の複屈折結晶の各々は上記常光線及び上記異常光線を決定する主軸を有している光アッテネータ。

【請求項 9】 請求項 8 に記載の光アッテネータであって、

上記各ファラデー回転子は、上記光路が通過するように設けられる磁気光学結晶と、与えられた電流に応じた可変磁界を上記磁気光学結晶に印加するための電磁石とを含む光アッテネータ。

40 【請求項 10】 請求項 9 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 のアッテネータユニットは上記与えられた電流が増大するのに従って上記第 1 のアッテネータユニットによる減衰が増大するように設けられ、

上記第 2 のアッテネータユニットは上記与えられた電流が増大するのに従って上記第 2 のアッテネータユニットによる減衰が減少するように設けられる光アッテネータ。

50 【請求項 11】 請求項 9 に記載の光アッテネータであ

って、
 上記第 1 及び第 2 の複屈折結晶の主軸は互いに直交しており、
 上記第 3 及び第 4 の複屈折結晶の主軸は互いに平行であり、
 上記各電磁石により印加される各可変磁界は上記光路に対して実質的に垂直であり、
 上記各ファラデー回転子は、上記与えられた電流が零であるときに上記各ファラデー回転角が実質的に 90° になるように上記各磁気光学結晶に固定磁界を印加するための永久磁石を更に含む光アッテネータ。

【請求項 1 2】 請求項 9 に記載の光アッテネータであって、
 上記第 1 及び第 2 の複屈折結晶の主軸は互いに直交しており、
 上記第 3 及び第 4 の複屈折結晶の主軸は互いに直交しており、
 上記第 1 のアッテネータユニットの電磁石により印加される磁界は上記光路に対して実質的に垂直であり、
 上記第 1 のアッテネータユニットのファラデー回転子は、上記与えられた電流が零であるときに上記ファラデー回転角が実質的に 90° になるように上記磁気光学結晶に固定磁界を印加するための永久磁石を更に含み、
 上記第 2 のアッテネータユニットの電磁石により印加される磁界は上記光路に対して実質的に平行である光アッテネータ。

【請求項 1 3】 請求項 7 に記載の光アッテネータであって、
 上記第 1 及び第 2 の複屈折結晶の各々は第 1 の平面上で定義されるくさび角を有するくさび板からなり、
 上記第 3 及び第 4 の複屈折結晶の各々は第 2 の平面上で定義されるくさび角を有するくさび板からなる光アッテネータ。

【請求項 1 4】 請求項 1 3 に記載の光アッテネータであって、
 上記第 1 及び第 2 の平面は互いに平行でない光アッテネータ。

【請求項 1 5】 請求項 1 3 に記載の光アッテネータであって、
 上記第 1 及び第 2 の平面は互いに平行であり、
 上記第 1 及び第 2 のアッテネータユニットを光学的に接続するための第 3 の光ファイバを更に備えた光アッテネータ。

【請求項 1 6】 請求項 1 に記載の光アッテネータであって、
 上記各ファラデー回転子は、上記光路が通過するように設けられる磁気光学結晶と、互いに異なる方向の第 1 及び第 2 の磁界を上記磁気光学結晶に印加する磁界印加手段と、上記第 1 及び第 2 の磁界の少なくとも一方を変化させる磁界調整手段とを含み、

上記第 1 及び第 2 の磁界はこれらの合成磁界が上記磁気光学結晶の磁化を飽和させるのに十分な強さを有するように設定される光アッテネータ。

【請求項 1 7】 請求項 1 6 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 及び第 2 の磁界の方向は上記光路と平行な平面上で互いに直交する光アッテネータ。

【請求項 1 8】 請求項 1 6 に記載の光アッテネータであって、

10 上記磁界印加手段は上記第 1 及び第 2 の磁界をそれぞれ印加する電磁石及び永久磁石であり、

上記磁界調整手段は上記電磁石の駆動電流を調整する光アッテネータ。

【請求項 1 9】 請求項 1 8 に記載の光アッテネータであって、

上記第 2 の磁界の方向は上記光路と実質的に平行である光アッテネータ。

【請求項 2 0】 請求項 1 に記載の光アッテネータであって、

20 上記制御する手段は上記第 1 のアッテネータユニットのファラデー回転角と上記第 2 のアッテネータユニットのファラデー回転角とが実質的に等しくなる条件の下で各ファラデー回転角を制御する光アッテネータ。

【請求項 2 1】 請求項 1 に記載の光アッテネータであって、

30 上記制御する手段は、上記光アッテネータの減衰が比較的大きい場合には上記第 1 のアッテネータユニットのファラデー回転角と上記第 2 のアッテネータユニットのファラデー回転角とが実質的に等しくなる条件の下で各ファラデー回転角を制御し、上記光アッテネータの減衰が比較的小さい場合には上記第 1 のアッテネータユニットのファラデー回転角と上記第 2 のアッテネータユニットのファラデー回転角とが異なる条件の下で各ファラデー回転角を制御する光アッテネータ。

【請求項 2 2】 光路上でカスケード接続された第 1 及び第 2 のアッテネータユニットと、

該第 1 及び第 2 のアッテネータユニットに接続される制御回路とを備え、

40 上記第 1 及び第 2 のアッテネータユニットの各々は、上記光路上に配置され波長の関数として与えられるファラデー回転角を生じさせるためのファラデー回転子と、上記ファラデー回転角によって決定される減衰を上記光路について生じさせるための偏光手段とを含み、

上記制御回路は、上記第 1 のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性と上記第 2 のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性との和として与えられる波長特性が所望の傾斜を有するように上記各ファラデー回転角を制御する手段を含む光アッテネータ。

50 【請求項 2 3】 各々可変の減衰を与えるための第 1 及び第 2 のアッテネータユニットを備え、

5

該第 1 のアッテネータユニットの減衰の第 1 の波長特性は該第 2 のアッテネータユニットの減衰の第 2 の波長特性と異なる光アッテネータ。

【請求項 2 4】 請求項 2 3 に記載の光アッテネータであって、

上記第 2 の波長特性は実質的に上記第 1 の波長特性を打ち消す光アッテネータ。

【請求項 2 5】 互いに異なる波長を有する複数の光信号を含む波長分割多重光が伝送される光伝送路と、該光伝送路の途中に設けられ各々可変の減衰を与えるための第 1 及び第 2 のアッテネータユニットとを備え、該第 1 のアッテネータユニットの減衰の第 1 の波長特性は該第 2 のアッテネータユニットの減衰の第 2 の波長特性と異なるシステム。

【請求項 2 6】 請求項 2 5 に記載のシステムであって、

上記第 2 の波長特性は実質的に上記第 1 の波長特性を打ち消すシステム。

【請求項 2 7】 第 1 の光増幅ユニットと、第 2 の光増幅ユニットと、

該第 1 及び第 2 の光増幅ユニットの間に設けられ各々可変の減衰を与えるための第 1 及び第 2 のアッテネータユニットとを備え、

該第 1 のアッテネータユニットの減衰の第 1 の波長特性は該第 2 のアッテネータユニットの減衰の第 2 の波長特性と異なる光増幅器。

【請求項 2 8】 請求項 2 7 に記載の光増幅器であって、

上記第 2 の波長特性は実質的に上記第 1 の波長特性を打ち消す光増幅器。

【請求項 2 9】 請求項 2 7 に記載の光増幅器であって、

上記第 1 及び第 2 の波長特性は上記第 2 の光増幅ユニットから出力される光の波長特性を実質的に打ち消す光増幅器。

【請求項 3 0】 光増幅ユニットと、該光増幅ユニットの出力に接続される光アッテネータとを備え、

該光アッテネータは各々可変の減衰を与えるための第 1 及び第 2 のアッテネータユニットを備えており、

該第 1 のアッテネータユニットの減衰の第 1 の波長特性は該第 2 のアッテネータユニットの減衰の第 2 の波長特性と異なる光増幅器。

【請求項 3 1】 請求項 3 0 に記載の光増幅器であって、

上記第 2 の波長特性は実質的に上記第 1 の波長特性を打ち消す光増幅器。

【請求項 3 2】 光増幅ユニットと、該光増幅ユニットの入力に接続される光アッテネータとを備え、

6

該光アッテネータは各々可変の減衰を与えるための第 1 及び第 2 のアッテネータユニットを備えており、

該第 1 のアッテネータユニットの減衰の第 1 の波長特性は該第 2 のアッテネータユニットの減衰の第 2 の波長特性と異なる光増幅器。

【請求項 3 3】 請求項 3 2 に記載の光増幅器であって、

上記第 2 の波長特性は実質的に上記第 1 の波長特性を打ち消す光増幅器。

10 【請求項 3 4】 異なる波長を有する光信号をそれぞれ出力する複数の E/O 変換器と、

該複数の E/O 変換器からの光信号のレベルを調整するための複数のレベル調整ユニットと、

該複数のレベル調整ユニットから出力された光信号を波長分割多重して波長分割多重光を得るための光マルチプレクサとを備え、

上記複数のレベル調整ユニットの各々は、各々可変の減衰を与えるための第 1 及び第 2 のアッテネータユニットを備えており、

20 該第 1 のアッテネータユニットの減衰の第 1 の波長特性は該第 2 のアッテネータユニットの減衰の第 2 の波長特性と異なる端局装置。

【請求項 3 5】 異なる波長を有する光信号をそれぞれ出力する複数の E/O 変換器と、

該複数の E/O 変換器からの光信号のレベルを調整するための複数のレベル調整ユニットと、

該複数のレベル調整ユニットから出力された光信号を波長分割多重して波長分割多重光を得るための光マルチプレクサと、

30 該光マルチプレクサから出力された波長分割多重光を増幅するための光増幅器とを備え、

該光増幅器は、光増幅ユニットと、該光増幅ユニットに接続される光アッテネータとを備えており、

該光アッテネータは、各々可変の減衰を与えるための第 1 及び第 2 のアッテネータユニットを備えており、

該第 1 のアッテネータユニットの減衰の第 1 の波長特性は該第 2 のアッテネータユニットの減衰の第 2 の波長特性と異なる端局装置。

【発明の詳細な説明】

40 【0 0 0 1】

【発明の属する技術分野】 本発明は 2 つのファラデー回転子を備えた光アッテネータに関し、特に光アッテネータ並びに該光アッテネータを備えたシステム、光増幅器及び端局装置に関する。

【0 0 0 2】

【従来の技術】 光通信システムを構築する場合、光増幅器等の光デバイスに供給される光のパワーを調節するために、光アッテネータが使用されることがある。この種の光アッテネータとしては、従来、機械的な動作によって減衰を変化させるようにしたものがある。例えば、光

50

路中に挿入される減衰膜の減衰に分布を持たせておき、この減衰膜を機械的に変位させることで減衰が調節される。

【0003】光アッテネータをその減衰が制御の対象となるようなシステムに組み込んで使用することが実用上要求される場合がある。例えば、エルビウムドープファイバ増幅器（EDFA）においては、一定の出力レベルを維持するために、一旦増幅された光信号が、出力レベルのモニタ値によってフィードバック制御された減衰を与えるための光アッテネータに供給される。このような場合、機械的に減衰を調整する光アッテネータの使用は、システムの信頼性を高めるためには好ましいものではない。

【0004】この点に鑑み、本発明者は先に機械的可動部分を有しない実用性に優れた光アッテネータを提案した（例えば特願平 4 - 2 0 5 0 4 4 号）。この光アッテネータは電磁石への印加電流の変化によりファラデー回転角が変化するファラデー回転子を備えており、減衰はファラデー回転角の調節により設定される。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】光アッテネータは入力される光に対してその波長に係わらず一様な減衰を与えることが望ましい。しかし、ファラデー回転子が波長特性を有している場合、即ちファラデー回転角が波長に依存して変化する場合、波長に従って減衰が変化してしまい、減衰の波長特性が平坦でなくなる。減衰の波長特性が平坦でない光アッテネータを波長分割多重システムに適用すると、チャンネル毎に光信号の減衰が異なるものとなり、信号パワーのチャンネル間偏差等の不都合が生じる。また、例えば EDFA で生じる利得傾斜（利得が波長に応じて変化する性質）をキャンセルするために、光アッテネータの減衰の波長特性を任意に設定し得るようにしたいという要求もある。

【0006】よって、本発明の目的は、減衰の波長特性が平坦な光アッテネータを提供することにある。本発明の他の目的は、減衰の波長特性を調節し得る光アッテネータを提供することにある。

【0007】本発明の更に他の目的は、そのような光アッテネータを備えたシステム、光増幅器及び端局装置を提供することにある。

【0008】

【課題を解決するための手段】本発明の第 1 の側面によると、光路上でカスケード接続された第 1 及び第 2 のアッテネータユニットと、第 1 及び第 2 のアッテネータユニットに接続される制御回路とを備えた光アッテネータが提供される。第 1 及び第 2 のアッテネータユニットの各々は、光路上に配置されたファラデー回転子を含む。ファラデー回転子は、波長の関数として与えられるファラデー回転角を生じさせる。第 1 及び第 2 のアッテネータユニットの各々は、更に、ファラデー回転角によって

決定される減衰を光路について生じさせるための偏光手段を含む。特に、本発明のこの側面による光アッテネータでは、制御回路は、第 1 のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性が第 2 のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性によって実質的に相殺されるように各ファラデー回転角を制御する手段を含む。

【0009】この構成によると、各ファラデー回転子が波長の関数として与えられるファラデー回転角を生じさせているにも係わらず、制御回路が動作することにより、トータルの減衰の波長特性が実質的に平坦化される。

【0010】本発明の第 2 の側面による光アッテネータにおいては、制御回路は、第 1 のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性と第 2 のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性との和として与えられる波長特性が所望の傾斜を有するように各ファラデー回転角を制御する手段を含む。これにより、減衰の波長特性を自由に調節し得るようになる。

【0011】本発明の第 3 の側面によると、各々可変の減衰を与えるための第 1 及び第 2 のアッテネータユニットを備え、該第 1 のアッテネータユニットの減衰の第 1 の波長特性は該第 2 のアッテネータユニットの減衰の第 2 の波長特性と異なる光アッテネータが提供される。

【0012】本発明の第 4 の側面によると、互いに異なる波長を有する複数の光信号を含む波長分割多重光が伝送される光伝送路と、該光伝送路の途中に設けられ各々可変の減衰を与えるための第 1 及び第 2 のアッテネータユニットとを備え、該第 1 のアッテネータユニットの減衰の第 1 の波長特性は該第 2 のアッテネータユニットの減衰の第 2 の波長特性と異なるシステムが提供される。

【0013】本発明の第 5 の側面によると、第 1 の光増幅ユニットと、第 2 の光増幅ユニットと、該第 1 及び第 2 の光増幅ユニットの間に設けられ各々可変の減衰を与えるための第 1 及び第 2 のアッテネータユニットとを備え、該第 1 のアッテネータユニットの減衰の第 1 の波長特性は該第 2 のアッテネータユニットの減衰の第 2 の波長特性と異なる光増幅器が提供される。

【0014】本発明の第 6 の側面によると、光増幅ユニットと、該光増幅ユニットの出力に接続される光アッテネータとを備え、該光アッテネータは各々可変の減衰を与えるための第 1 及び第 2 のアッテネータユニットを備えており、該第 1 のアッテネータユニットの減衰の第 1 の波長特性は該第 2 のアッテネータユニットの減衰の第 2 の波長特性と異なる光増幅器が提供される。

【0015】本発明の第 7 の側面によると、光増幅ユニットと、該光増幅ユニットの入力に接続される光アッテネータとを備え、該光アッテネータは各々可変の減衰を与えるための第 1 及び第 2 のアッテネータユニットを備えており、該第 1 のアッテネータユニットの減衰の第 1 の波長特性は該第 2 のアッテネータユニットの減衰の第

2の波長特性と異なる光増幅器が提供される。

【0016】本発明の第8の側面によると、異なる波長を有する光信号をそれぞれ出力する複数のE/O変換器と、該複数のE/O変換器からの光信号のレベルを調整するための複数のレベル調整ユニットと、該複数のレベル調整ユニットから出力された光信号を波長分割多重して波長分割多重光を得るための光マルチプレクサとを備え、上記複数のレベル調整ユニットの各々は、各々可変の減衰を与えるための第1及び第2のアッテネータユニットを備えており、該第1のアッテネータユニットの減衰の第1の波長特性は該第2のアッテネータユニットの減衰の第2の波長特性と異なる端局装置が提供される。

【0017】本発明の第9の側面によると、異なる波長を有する光信号をそれぞれ出力する複数のE/O変換器と、該複数のE/O変換器からの光信号のレベルを調整するための複数のレベル調整ユニットと、該複数のレベル調整ユニットから出力された光信号を波長分割多重して波長分割多重光を得るための光マルチプレクサと、該光マルチプレクサから出力された波長分割多重光を増幅するための光増幅器とを備え、該光増幅器は、光増幅ユニットと、該光増幅ユニットに接続される光アッテネータとを備えており、該光アッテネータは、各々可変の減衰を与えるための第1及び第2のアッテネータユニットを備えており、該第1のアッテネータユニットの減衰の第1の波長特性は該第2のアッテネータユニットの減衰の第2の波長特性と異なる端局装置が提供される。

【0018】

【発明の実施の形態】以下、添付図面を参照して本発明の望ましい実施の形態を詳細に説明する。全図を通して実質的に同一の部分には同一の符号が付されており、方向その他の特定が必要な場合には、互いに直交するX軸、Y軸及びZ軸による三次元座標系が採用されている。

【0019】図1は本発明による光アッテネータの第1実施形態を示す図である。この光アッテネータは、Z軸に平行な光路OP上でカスケード接続された2つのアッテネータユニットAU1及びAU2と、ユニットAU1及びAU2に接続される制御回路2とを備えている。

【0020】アッテネータユニットAU1及びAU2の各々は、光路OPに沿って伝搬する光に対して可変のファラデー回転角を与えるためのファラデー回転子FRと、ファラデー回転角によって決定される減衰を生じさせるための偏光ユニットPUとを含んでいる。

【0021】特にこの実施形態では、アッテネータユニットAU1の偏光ユニットPUは、ファラデー回転子FRを挟むように光路OP上に設けられる偏光子4及び6からなり、アッテネータユニットAU2の偏光ユニットPUは、ファラデー回転子FRを挟むように光路OP上に設けられる偏光子8及び10からなる。偏光子4、6、8及び10は、各々通過する直線偏光の偏波面を決

定する軸4A、6A、8A及び10Aをそれぞれ有している。ここでは、軸4AはY軸に平行であり、軸6A、8A及び10AはX軸に平行である。

【0022】図1の光アッテネータの動作をまず簡単に説明しておく。アッテネータユニットAU1のファラデー回転子FRによって与えられるファラデー回転角が 90° であるときには、軸4A及び6Aが互いに直交していることから、アッテネータユニットAU1の減衰は最小になり、また、アッテネータユニットAU2のファラデー回転子FRによって与えられるファラデー回転角が 0° であるときには、軸8A及び10Aが互いに平行であることから、アッテネータユニットAU2の減衰は最小になり、従って、この光アッテネータによるトータルの減衰は最小になる。

【0023】ここで、広義には、 90° のファラデー回転角というのは、 $90^\circ + n \cdot 180^\circ$ (n は整数)を含み、 0° のファラデー回転角というのは、 $m \cdot 180^\circ$ (m は整数)を含む。

【0024】アッテネータユニットAU1のファラデー回転子FRによって与えられるファラデー回転角が 0° に近く、また、アッテネータユニットAU2のファラデー回転子FRによって与えられるファラデー回転角が 90° に近いときには、この光アッテネータによるトータルの減衰は最大となる。

【0025】図2を参照すると、各ファラデー回転子FRの具体的構成例が示されている。ファラデー回転子FRは、光路OPが通過するように設けられる磁気光学結晶12を有している。

【0026】一般に、磁気光学結晶12にある磁界を印加した状態で、即ち磁気光学結晶12をある磁場の中においた状態で、直線偏光が磁気光学結晶12内を通過すると、その偏光方向は、その伝搬方向にかかわらず常に同じ回転方向に回転される。

【0027】ここで、「偏光方向」は、直線偏光の電場ベクトルを含む平面の、伝搬方向と垂直な平面への投影で定義される。この偏光方向が回転する現象はファラデー回転と称され、偏光方向の回転角の大きさ(ファラデー回転角)は、印加磁界により生じる磁気光学結晶12の磁化の方向及び強さ(大きさ)に依存する。具体的には、ファラデー回転角は、磁気光学結晶12の磁化の強さの光の伝搬方向の成分の大きさによって決定される。

【0028】従って、磁気光学結晶12と結晶12に対して光の伝搬方向と同じ方向に磁界を印加する手段とを用いれば、その印加磁界を調節することによって一見するとファラデー回転角を有効に調整することができそうである。しかし、ここで考慮しておくべき点は、印加磁界の大きさが比較的小さい場合には、印加磁界による磁気光学結晶12の磁化が飽和状態に達せず、磁気光学結晶12内に多数の磁区が存在してしまうことである。

【0029】このような多数の磁区が存在は、ファラデー

一回転角の再現性を悪化させるし、良好な再現性が確保されたとしてもファラデー回転角の連続な可変を困難にする。また、磁気光学結晶 1 2 内に多数の磁区が存在する場合には、磁区間の界面における光の散乱による減衰も生じ、実用上の不都合となる。

【0030】そこで、この実施形態では、磁気光学結晶 1 2 に互いに異なる方向の第 1 及び第 2 の磁界を印加するようにし、第 1 及び第 2 の磁界の少なくとも一方を変化させることにより、得られるファラデー回転角が変化するようにし、第 1 及び第 2 の磁界をこれらの合成磁界が磁気光学結晶 1 2 の磁化の強さを飽和させるのに十分な強さを有するように設定している。

【0031】磁気光学結晶 1 2 において磁化の強さが飽和した状態は、結晶 1 2 の磁区が 1 つになった状態として理解することができる。磁気光学結晶 1 2 の磁化が飽和している状態で第 1 及び第 2 の磁界の少なくとも一方を変化させることにより、ファラデー回転角の連続な可変が可能になり、磁区間の界面における光の散乱に起因する損失の発生を防止することができる。また、ファラデー回転角の再現性も良好になる。

【0032】望ましくは、ファラデー回転角の有効な可変を可能にするために、第 1 及び第 2 の磁界は、光路 O P に平行な平面内で互いに直交する方向にそれぞれ印加される。

【0033】図 2 の実施形態では、磁気光学結晶 1 2 に Z 軸と平行な固定磁界 F M (図 1 参照) を印加するために、一対の永久磁石 1 4 が磁気光学結晶 1 2 の上下面を挟むように設けられており、また、磁気光学結晶 1 2 に X 軸と平行な可変磁界 V M (図 1 参照) を印加するために、電磁石 1 6 が磁気光学結晶 1 2 の左右側面を挟むように設けられている。電磁石 1 6 のコイル 1 8 は可変電流源 2 0 に接続されている。可変電流源 2 0 により電磁石 1 6 に供給される駆動電流を調節することによって、磁気光学結晶 1 2 の磁化の方向が変化し、それに伴ってファラデー回転角が変化する。

【0034】磁気光学結晶 1 2 としては、薄く切り出した Y I G (イットリウム・鉄ガーネット) やエピタキシャル結晶成長させた (G d B i)₃ (F e A l G a)₅ O₁₂ 等を用いることができる。

【0035】図 2 の実施形態で、固定磁界 F M を光路 O P と平行に印加し、可変磁界 V M を光路 O P に垂直に印加しているのは、光路 O P に平行な方向への磁界の印加と比較して光路 O P に垂直な方向への磁界の印加が容易であり、容易な方に構成が複雑な電磁石 1 6 を適用したいという要求があるからである。

【0036】図 3 は、図 2 に示されるファラデー回転子 F R でファラデー回転角が変化する原理を説明するための図である。磁気光学結晶 1 2 に印加される磁界及び結晶 1 2 の磁化の方向及び強さをベクトル表示するために、図 3 の縦軸及び横軸はそれぞれ Z 軸及び X 軸に対応

している。

【0037】今、電磁石 1 6 の駆動電流が実質的に 0 であり、永久磁石 1 4 のみによって磁気光学結晶 1 2 に固定磁界 F M が印加されている場合、結晶 1 2 の磁化は符号 2 2 で示されるように Z 軸に平行になる。固定磁界 F M の強さは、固定磁界 F M だけで結晶 1 2 の磁化が飽和するように設定されている。この実施形態では、固定磁界 F M のみが印加されているときに、ファラデー回転角が 90° になるようにされている。

10 【0038】電磁石 1 6 による可変磁界 V M が X 軸と平行に印加されると、合成磁界は符号 2 4 で示されるように固定磁界 F M 及び可変磁界 V M の合成ベクトルで与えられる。この合成磁界 2 4 により磁気光学結晶 1 2 には符号 2 6 で示されるような磁化が生じる。磁化 2 6 の方向と合成磁界 2 4 の方向は互いに平行であり、磁気光学結晶 1 2 の磁化が飽和していることから磁化 2 6 の長さ(磁化ベクトルの長さ)は磁化 2 2 の長さ(磁化ベクトルの長さ)に一致する。

20 【0039】磁気光学結晶 1 2 の磁化の強さが一定であるからといって、結晶 1 2 におけるファラデー回転角への磁化の寄与度が同じではない。ファラデー回転角が当該磁化の方向と光の伝搬方向との関係にも依存するからである。

【0040】即ち、磁化 2 2 が生じている状態と磁化 2 6 が生じている状態とを比較すると、磁化 2 2 の Z 軸成分(磁化 2 2 そのもの)に対して磁化 2 6 の Z 軸成分 2 8 が減少している分だけ、後者のファラデー回転角が小さくなるのである。

30 【0041】具体的には、図 2 に示されるファラデー回転子 F R では、永久磁石 1 6 の駆動電流を 0 から最大値に変化させていくことによって、ファラデー回転角は 90° から 0° に向かって小さくなっていく。

【0042】図 4 は、図 1 に示されるアッテネータユニット A U 1 及び A U 2 の各々における減衰と電磁石 1 6 の駆動電流との関係を示すグラフである。アッテネータユニット A U 1 においては、軸 4 A 及び 6 A が互いに垂直であり、また、電磁石 1 6 による可変磁界 V M が Z 軸と垂直な方向に印加されているので、駆動電流が増大するのに従って減衰は連続的に増大していく。

40 【0043】一方、アッテネータユニット A U 2 においては、軸 8 A 及び 10 A が互いに平行であり、また、永久磁石 1 6 による可変磁界 V M が Z 軸と垂直に印加されているので、電磁石 1 6 の駆動電流が増大するの従って減衰は連続的に減少していく。

50 【0044】このような 2 つのアッテネータユニット A U 1 及び A U 2 の組み合わせにより減衰の波長特性が平坦になる原理を以下に説明する。図 5 は、ある磁気光学結晶の磁化を飽和させたときのファラデー回転角の波長特性の一例を示すグラフである。縦軸はファラデー回転角 (deg/cm)、横軸はファラデー回転角が与えら

れる光の波長 (μm) を示している。この磁気光学結晶の例では、波長が長くなるに従って単位長さ当たりのファラデー回転角が減少している。

【0045】図6を参照して、磁気光学結晶12が図5のような特性を有しているとして、図1の光アッテネータにおける各ファラデー回転角の波長特性の影響を説明する。今、アッテネータユニットAU1に供給される波長 λ_2 の光に与えられるファラデー回転角が 45° になるように電磁石16の駆動電流が設定されているとする。この場合、波長 λ_2 よりも長い波長 λ_1 の光に与えられるファラデー回転角は 45° よりも小さくなり、また、波長 λ_2 よりも短い波長 λ_3 の光に与えられるファラデー回転角は 45° よりも大きくなる。

【0046】アッテネータユニットAU1においては、ファラデー回転角が 90° から 0° に近づくに従って減衰は増大するので、波長 λ_1 、 λ_2 及び λ_3 の光に対するアッテネータユニットAU1の減衰をそれぞれ a_1 (dB)、 a_2 (dB) 及び a_3 (dB) とすると、 $a_3 < a_2 < a_1$ となる。

【0047】これに対して、アッテネータユニットAU2においては、ファラデー回転角が 90° から 0° に近づくに従って減衰が小さくなるので、ファラデー回転角の波長特性が実質的にリニアな範囲においては、波長 λ_1 、 λ_2 及び λ_3 の光に対するアッテネータユニット2の減衰はそれぞれ a_3 (dB)、 a_2 (dB) 及び a_1 (dB) となる。

【0048】このように、ファラデー回転角の波長特性が図5に示されるように負の傾斜を有している場合には、電磁石16の駆動電流が増大するのに従って減衰が増大するようにされているアッテネータユニットAU1においては、波長が長くなるに従って減衰が大きくなり、一方、電磁石16の駆動電流が増大するのに従って減衰が減少するようにされているアッテネータユニットAU2においては、波長が長くなるに従って減衰が小さくなるのである。

【0049】図7の(A)及び(B)は、それぞれ、アッテネータユニットAU1及びAU2における減衰の波長特性の変化を示す図である。アッテネータユニットAU1にあっては、図7の(A)に示されるように、電磁石16の駆動電流が大きくなるに従って、減衰の波長特性が右上がりになる傾向が強くなっており、一方、アッテネータユニットAU2にあっては、図7の(B)に示されるように、駆動電流が小さくなるに従って減衰の波長特性が右下がりになる傾向が強くなっている。

【0050】アッテネータユニットAU1におけるファラデー回転角を θ_{F1} とすると、アッテネータユニットAU1の減衰 (dB) は、

$$10 \cdot \log [\sin^2 \theta_{F1}]$$

で与えられる。従って、波長が $\Delta\lambda$ 増えたときの透過光パワーの変化は、

$$-\sin 2\theta_{F1} \sin (K\theta_{F1}\Delta\lambda)$$

となる。ここで、Kはファラデー回転角の波長特性を一次近似した場合における係数である。

【0051】一方、アッテネータユニットAU2におけるファラデー回転角を θ_{F2} とすると、アッテネータユニットAU2の減衰 (dB) は、

$$10 \cdot \log [\sin^2 (90^\circ - \theta_{F2})]$$

で与えられる。従って、波長が $\Delta\lambda$ 増えたときの透過光パワーの変化は、

$$\sin 2\theta_{F2} \sin (K\theta_{F2}\Delta\lambda)$$

となる。従って、次に示す方程式の解を与える (θ_{F1} , θ_{F2}) の組み合わせの群は、アッテネータユニットAU1における減衰の波長特性がアッテネータユニットAU2における減衰の波長特性によって実質的に相殺される条件を与える。

$$\sin 2\theta_{F1} \sin (K\theta_{F1}\Delta\lambda) + \sin 2\theta_{F2} \sin (K\theta_{F2}\Delta\lambda) = 0$$

例えば、アッテネータユニットAU1におけるファラデー回転角とアッテネータユニットAU2におけるファラデー回転角とが実質的に等しくなる条件の下で各ファラデー回転角を制御することによって、図1に示される光アッテネータのトータルの減衰の波長特性を平坦にすることができる。

【0053】或いは、トータルの減衰が比較的大きい場合、例えば図4に示される2つの曲線の交点よりも上の減衰の和がトータルの減衰となる場合には、アッテネータユニットAU1におけるファラデー回転角とアッテネータユニットAU2におけるファラデー回転角とが実質的に等しくなる条件の下で各ファラデー回転角を制御するようにし、一方、トータルの減衰が比較的小さい場合、例えば同交点よりも下の減衰の和がトータルの減衰となる場合には、アッテネータユニットAU1におけるファラデー回転角とアッテネータユニットAU2におけるファラデー回転角とが異なる条件の下で各ファラデー回転角を制御するようにしてもよい。

【0054】このような柔軟性に富んだ制御を行うのに適した制御回路2の構成例を図8に示す。図8は制御回路2の実施形態を示すブロック図である。ここでは、制御回路2は、所望の減衰を与えるための制御入力に基づき各電磁石16の駆動電流を決定するための演算等を行うためのCPU (中央演算ユニット) 30と、演算結果等に関するデータを一時的に記憶するためのRAM (ランダムアクセスメモリ) 32と、演算に必要なプログラム及びデータ等が記憶されているROM (リードオンリーメモリ) 34と、データの入出力のためのI/Oポート36とを備えている。CPU30、RAM32、ROM34及びI/Oポート36は、データバス38により相互に接続されている。

【0055】ROM34には、予め得られた、前述の方程式の解の群と当該解により得られる減衰との関係を表

すデータテーブルが格納されている。制御入力により所望のトータルの減衰が与えられると、その減衰を得るための解がCPU30により選択され、その解を満足するようにアッテネータユニットAU1及びAU2におけるファラデー回転角が設定される。具体的には、I/Oポート36から出力されたデジタルデータがD/A変換器40及び42によりそれぞれアナログの制御信号に変換され、各制御信号はアッテネータユニットAU1及びAU2の各々の可変電流源20に供給される。これにより、各電磁石16の駆動電流が設定され、所望の減衰が得られるようなファラデー回転角の組み合わせが実行される。

【0056】例えば、トータルの減衰を小さくする場合には、アッテネータユニットAU1におけるファラデー回転角が90°に近くなるような領域で電磁石16が駆動されると共に、アッテネータユニットAU2におけるファラデー回転角が0°に近い領域で電磁石16が駆動される。

【0057】このように、本実施形態によると、制御回路2が、アッテネータユニットAU1における減衰の波長特性がアッテネータユニットAU2における減衰の波長特性によって実質的に相殺されるように各ファラデー回転角を制御するようにしているので、トータルの減衰の波長特性を平坦にすることができる。

【0058】図9は本発明による光アッテネータの第2実施形態を示す図である。この実施形態は、図1の第1実施形態におけるアッテネータユニットAU2のファラデー回転子FR及び偏光子10に代えて、変更されたファラデー回転子FR'及び偏光子10'が用いられている点で特徴付けられる。ファラデー回転子FR'の内部構成は図示しないが、可変磁界VMが光路OPと平行に設定され、固定磁界FMが光路OPと垂直に設定されるように改変されている。また、偏光子10'はY軸に平行な軸10A'を有している。この構成によっても、アッテネータユニットAU2における電磁石の駆動電流が増大するのに従ってアッテネータユニットAU2による減衰が減少するので、図1の第1実施形態におけるのと同様の原理に従って、アッテネータユニットAU1における減衰の波長特性がアッテネータユニットAU2における減衰の波長特性によって実質的に相殺され、トータルの減衰の波長特性を平坦にすることができる。

【0059】図10は本発明による光アッテネータの第3実施形態を示す図である。この実施形態は、図1の第1実施形態におけるアッテネータユニットAU2の偏光子10に代えて、変更された偏光子10'が用いられている点で特徴付けられる。偏光子10'はY軸に平行な軸10A'を有している。

【0060】軸8A及び10A'は互いに直交しており、軸A4及び6Aも互いに直交しており、アッテネータユニットAU1及びAU2のファラデー回転子FRは

同じであるので、アッテネータユニットAU1及びAU2は同じように動作する。

【0061】即ち、アッテネータユニットAU1及びAU2の各々において、電磁石16の駆動電流が増大するのに従って減衰が増大する。また、アッテネータユニットAU1及びAU2の各々において、図7の(A)に示されるように、駆動電流が大きくなるに従って減衰の波長特性が右上がりになる傾向が強まる。

【0062】従って、制御回路2の動作を変更して、アッテネータユニットAU1における減衰の波長特性とアッテネータユニットAU2における減衰の波長特性との和として与えられる波長特性が所望の傾斜を有するような設定を行うことができる。つまり、この実施形態によると、トータルの減衰の波長特性を容易に調節し得るようになる。また、同じように動作する2つのアッテネータユニットAU1及びAU2がカスケード接続されているので、トータルの減衰の波長特性の調節のダイナミックレンジが大きくなる。

【0063】以上説明した実施形態では、アッテネータユニットAU1及びAU2の構成及び動作の理解を容易にするために、偏光子6及び8が別部材として図示されているが、軸6A及び8Aは互いに平行であるから、偏光子6及び8の何れか一方を省略してもよい。また、光路OPに沿って光がアッテネータユニットAU1及びAU2をこの順に通過するようにこの光アッテネータが使用される場合であって、アッテネータユニットAU1への入力光がYZ平面に平行な偏波面を有する直線偏光である場合には、偏光子4をも省略可能である。

【0064】以下、実用性に優れた本発明の望ましい幾つかの実施形態を説明する。ここでは、特定の複屈折結晶の組み合わせ及び光学的配置により、減衰が入力光の偏光状態に依存することが防止される。

【0065】図11は本発明による光アッテネータの第4実施形態を示す図である。この実施形態は、図1に示される偏光子4、6、8及び10に代えて各々複屈折結晶からなるくさび板44、46、48及び50がそれぞれ設けられている点で特徴付けられる。また、入力光ビームのための光ファイバ52及びレンズ54と、アッテネータユニットAU1及びAU2を光学的に結合するためのレンズ56、光ファイバ58及びレンズ60と、出力光ビームのためのレンズ62及び光ファイバ64が付加的に設けられている。

【0066】光ファイバ52及び58間を結合する光路は、くさび板44及び46の各々について定義される常光線及び異常光線によって提供され、光ファイバ58及び64間を結合する光路は、くさび板48及び50の各々について定義される常光線及び異常光線によって提供される。

【0067】この構成によると、光ファイバ52及び58間を結合する光路における減衰は、アッテネータユニ

ットAU1のファラデー回転子FRにおけるファラデー回転角によって決定され、また、光ファラデー58及び64間を結合する光路における減衰は、アッテネータユニットAU2のファラデー回転子FRにおけるファラデー回転角によって決定される。従って、出力用の光ファイバ64は入力用の光ファイバ52に対して各ファラデー回転角に応じた結合効率で光学的に結合されることとなり、所望のトータルの減衰が得られるようになる。

【0068】くさび板44及び46の各々は第1の平面上で定義されるくさび角を有しており、くさび板48及び50の各々は第2の平面上で定義されるくさび角を有している。特にこの実施形態では、第1及び第2の平面はYZ平面と平行である。

【0069】くさび板44及び46は、各々常光線及び異常光線を決定するための主軸44A及び46Aをそれぞれ有している。また、くさび板48及び50は、各々常光線及び異常光線を決定するための主軸48A及び50Aをそれぞれ有している。特にこの実施形態では、主軸44AはX軸と平行であり、主軸46A、48A及び50AはY軸と平行である。

【0070】くさび板44及び46は同一形状であり、これらはくさび板44の頂部及び底部がそれぞれくさび板46の底部及び頂部に対向し且つ対応する面同士が互いに平行になるように配置されている。また、くさび板48及び50も同一形状であり、これらはくさび板48の頂部及び底部がそれぞれくさび板50の底部及び頂部に対向し且つ対応する面同士が互いに平行になるように配置されている。

【0071】光ファイバ52のファイバ端52Aから放射された光は、レンズ54によりコリメートされて平行光ビームになる。このビームはビーム太さを無視して符号102で表される。ビーム102は、くさび板44においてその常光線に相当するビーム104と異常光線に相当するビーム106とに分離される。

【0072】ビーム104及び106はファラデー回転子FRで同じファラデー回転角だけ同じ向きにファラデー回転されそれぞれビーム108及び110になる。ビーム108は、くさび板46においてその常光線に相当するビーム112と異常光線に相当するビーム114とに分離される。ビーム110は、くさび板46においてその異常光線に相当するビーム116と常光線に相当するビーム118とに分離される。

【0073】ビーム112、114、116及び118がそれぞれ受けてきた屈折の履歴並びにくさび板44及び46の形状及び配置形態を考慮すると、ビーム112及び116は互いに平行であり、ビーム114及び118は互いに平行でない。

【0074】従って、互いに平行なビーム112及び116をレンズ56により収束させて光ファイバ58にその一方のファイバ端58Aから入射させることができ、

このとき互いに平行でないビーム114及び118は光路から逸れてファイバ端58Aには入射しない。

【0075】さて、アッテネータユニットAU1における減衰は、ビーム112及び116のトータルパワーのビーム102のパワーに対する比に対応している。例えば、ファラデー回転子FRのファラデー回転角が90°であるときには、ビーム104のパワーは原理的に全部112のパワーに移行し、ビーム106のパワーは原理的に全部ビーム116のパワーに移行するので、アッテネータユニットAU1の減衰は最も小さくなる。また、ファラデー回転子FRのファラデー回転角が0°である場合には、ビーム104のパワーは原理的には全部ビーム114のパワーに移行し、ビーム106のパワーは原理的には全部ビーム118のパワーに移行するので、アッテネータユニットAU1の減衰は最も大きくなる。従って、アッテネータユニットAU1においては、ファラデー回転角FRのファラデー回転角に応じた減衰が得られることとなる。

【0076】一方、ファラデー回転角が一定であれば、ビーム102の偏光状態に係わらずビーム112及び116のトータルパワーは一定であるので、アッテネータユニットAU1における減衰はビーム102（即ち入力ビーム）の偏光状態には依存しない。

【0077】続いて、光ファイバ58のファイバ端58Aに入射した光は、光ファイバ58の他方のファイバ端58Bから放射され、この光はレンズ60によりコリメートされて平行光ビームになる。このビームはビーム太さを無視して符号122で表される。

【0078】ビーム122は、くさび板48においてその常光線に相当するビーム124と異常光線に相当するビーム126とに分離される。ビーム124及び126は、アッテネータユニットAU2のファラデー回転子FRにおいて同じファラデー回転角で同じ向きにファラデー回転されそれぞれビーム128及び130になる。

【0079】ビーム128は、くさび板50においてその常光線に相当するビーム132と異常光線に相当するビーム134とに分離される。ビーム130は、くさび板50においてその異常光線に相当するビーム136と常光線に相当するビーム138とに分離される。

【0080】アッテネータユニットAU1におけるのと同じように考えると、ビーム132及び136は光ファイバ64のファイバ端64Aに入射し、ビーム134及び138は光路から逸れてファイバ端64Aには入射しない。

【0081】アッテネータユニットAU1におけるのと同じように、アッテネータユニットAU2による減衰は入力ビーム（ビーム122）の偏光状態には依存しない。しかしながら、主軸44A及び46Aが互いに垂直であるのに対して主軸48A及び主軸50Aは互いに平行であるから、アッテネータユニットAU2におけるフ

アラデー回転角の増減に対する減衰の増減の傾向は、アッテネータユニット A U 1 における同傾向と逆である。

【0082】例えば、アッテネータユニット A U 2 におけるファラデー回転角が 90° であるときには、ビーム 1 2 4 のパワーは原理的には全部ビーム 1 3 4 のパワーに移行し、ビーム 1 2 6 のパワーは原理的には全部ビーム 1 3 8 のパワーに移行するので、アッテネータユニット A U 2 による減衰は最も大きくなり、また、アッテネータユニット A U 2 におけるファラデー回転角が 0° であるときには、ビーム 1 2 4 のパワーは原理的には全部ビーム 1 3 2 のパワーに移行し、ビーム 1 2 6 のパワーは原理的には全部ビーム 1 3 6 のパワーに移行するので、アッテネータユニット A U 2 による減衰は最も小さくなる。

【0083】従って、図 1 の第 1 実施形態におけるのと同じように制御回路 2 が動作することによって、アッテネータユニット A U 1 における減衰の波長特性がアッテネータユニット A U 2 における減衰の波長特性によって実質的に相殺され、この光アッテネータにおけるトータルの減衰の波長特性は平坦になる。このように、本実施形態によると、減衰の波長特性が平坦であり、且つ、減衰が入力ビームの偏光状態に依存しない偏光無依存の光アッテネータの提供が可能になる。

【0084】図 1 1 の第 4 実施形態において、アッテネータユニット A U 1 及び A U 2 間を光学的に接続するために光ファイバ 5 8 並びにレンズ 5 6 及び 6 0 を用いているのは、次の理由による。即ち、光ファイバ 5 8 並びにレンズ 5 6 及び 6 0 を用いずに空間ビームによりアッテネータユニット A U 1 及び A U 2 を光学的に接続した場合、この光アッテネータではビーム 1 1 2 及び 1 1 6 のパワーの一部又は全部がビーム 1 3 2 及び 1 3 6 のパワーに移行することが予定されているのに対して、一旦光路から逸れたビーム 1 1 4 又は 1 1 8 のパワーがビーム 1 3 2 及び 1 3 6 のパワーに移行して所要の減衰が得られない恐れがあるからである。この不所望な再結合の主たる原因は、くさび板 4 4 及び 4 6 のくさび角が定義される第 1 の平面とくさび板 4 8 及び 5 0 のくさび角が定義される第 2 の平面とが互いに平行であるところにある。従って、第 1 及び第 2 の平面の一方を他方に対して Z 軸を中心に回転させた関係にして、第 1 及び第 2 の平面が互いに平行でないようにすることにより、光ファイバ 5 8 並びにレンズ 5 6 及び 6 0 を省略して、光アッテネータの挿入損失を小さく抑えることができる。例えば、第 1 及び第 2 の平面は互いに垂直である。具体的には次の通りである。

【0085】図 1 2 は本発明による光アッテネータの第 5 実施形態を示す図である。この実施形態は、図 1 1 の第 4 実施形態と対比して、アッテネータユニット A U 1 のくさび板 4 4 及び 4 6 がそれぞれ Z 軸の周りに 90° 回転させられて配置されると共に、これにより図 1 1 に

示される光ファイバ 5 8 並びにレンズ 5 6 及び 6 0 の省略が可能になっている点で特徴付けられる。

【0086】従って、くさび板 4 8 及び 5 0 のくさび角が定義される平面が Y Z 平面に平行であるのに対して、くさび板 4 4 及び 4 6 のくさび角が定義される平面は X Z 平面と平行である。また、主軸 4 4 A は Y 軸と平行であり、主軸 4 6 A は X 軸と平行である。

【0087】アッテネータユニット A U 1 及び A U 2 の各々における減衰が各ファラデー回転角により決定されることを含む光アッテネータの動作原理の詳細は図 1 1 の第 4 実施形態における動作原理に準じて理解することができるので、その説明は省略する。

【0088】図 1 2 の第 5 実施形態によっても、減衰の波長特性が平坦であり、且つ、減衰が入力ビームの偏光状態に依存しない偏光無依存の光アッテネータの提供が可能になる。また、図 1 2 の第 5 実施形態によると、図 1 1 の第 4 実施形態における光ファイバ 5 8 並びにレンズ 5 6 及び 6 0 が省略されている分だけ光アッテネータの挿入損失が小さくなる。

【0089】図 1 3 は、図 1 2 に示されるアッテネータユニット A U 1 における減衰の波長特性の測定結果を示す図である。縦軸は減衰の偏差 (dB)、横軸は波長 (nm) である。

【0090】アッテネータユニット A U 1 においては、主軸 4 4 A 及び 4 6 A が互いに垂直であり、ファラデー回転子 F R の電磁石 1 6 (図 2 参照) の駆動電流を 0 から増大させていくのに従って得られるファラデー回転角は 90° から 0° に近づいていくので、駆動電流を増大させていくのに従って減衰は大きくなるべきである。駆動電流を 0 mA, 5 mA, 10 mA, 15 mA, 20 mA, 25 mA 及び 30 mA に設定して、それぞれ波長 1 5 4 5 nm に対する減衰を測定した結果、1. 3 dB, 2. 0 dB, 7. 1 dB, 13. 4 dB, 17. 3 dB, 21. 8 dB 及び 27. 1 dB となった。また、駆動電流を増大させるのに従って、減衰の波長特性の右上がりの傾斜が次第に大きくなっていった。この測定結果は、図 7 の (A) で説明した減衰の波長特性に一致するものである。

【0091】図示はしないが、図 1 2 に示されるアッテネータユニット A U 2 においては、図 1 3 の波長特性と逆の波長特性が得られることが判明した。図 1 4 の

(A) ~ (D) は図 1 2 の実施形態の光アッテネータにおけるトータルの減衰の波長特性の測定結果を示すグラフである。各測定では、与えられた波長帯域 (1 5 3 0 nm - 1 5 6 0 nm) において実質的に白色光源となる LED からの光を光アッテネータに入力し、光アッテネータの出力光を光スペクトラムアナライザに入力し、減衰の波長特性が測定された。

【0092】図 1 4 の (A) はアッテネータユニット A U 1 における駆動電流 I_1 を 10. 5 mA に設定しアッ

テネータユニット A U 2 における駆動電流 I_2 を 7.9 mA に設定したときの測定結果である。得られた減衰は 10 dB であり、減衰の波長特性は十分に平坦であった。

【0093】図 1 4 の (B) は $I_1 = 20.0$ mA, $I_2 = 6.7$ mA に設定したときの測定結果である。得られた減衰は 15 dB であり、減衰の波長特性は十分に平坦であった。

【0094】図 1 4 の (C) は $I_1 = 25.8$ mA, $I_2 = 6.2$ mA に設定したときの測定結果である。得られた減衰は 25 dB であり、減衰の波長特性は十分に平坦であった。

【0095】図 1 4 の (D) は $I_1 = 29.1$ mA, $I_2 = 5.5$ mA に設定したときの測定結果である。得られた減衰は 25 dB であり、減衰の波長特性は十分に平坦であった。

【0096】図 1 5 は本発明による光アッテネータの第 6 実施形態を示す図である。図 1 2 の第 5 実施形態では、アッテネータユニット A U 2 のファラデー回転子 F R において、駆動電流を増大させるのに従って可変磁界 V M が増大し、ファラデー回転角は 90° から 0° に近づいていくように減少していくが、図 1 5 の第 6 実施形態では、可変磁界 V M 及び固定磁界 F M の印加方向が逆であるファラデー回転子 F R' が用いられている。従って、ファラデー回転子 F R' における駆動電流を 0 から大きくしていくことによって、ファラデー回転角は 0° から 90° に向かって増大していく。

【0097】また、図 1 5 の第 6 実施形態では、くさび板 4 8 の主軸 4 8 A に直交する主軸 5 0 A' を有するくさび板 5 0' が用いられている。主軸 5 0 A' は X 軸に平行である。

【0098】この変更されたアッテネータユニット A U 2 においては、ファラデー回転子 F R' の駆動電流が 0 であるときには、ファラデー回転角は 0° であり、アッテネータユニット A U 2 の減衰は最も大きくなり、駆動電流を増やしていくと、ファラデー回転角は 90° に近づいていくので、アッテネータユニット A U 2 の減衰は小さくなっていく。

【0099】従って、図 9 の第 2 実施形態及び図 1 2 の第 5 実施形態の原理に準じて理解されるように、図 1 5 の第 6 実施形態によると、減衰の波長特性が平坦であり、且つ、減衰が入力ビームの偏光状態に依存しない偏光無依存の光アッテネータの提供が可能になる。

【0100】図 1 6 は本発明による光アッテネータの第 7 実施形態を示す図である。図 1 2 の第 5 実施形態で Y 軸と平行な主軸 5 0 A を有するくさび板 5 0 が用いられているの対比して、図 1 6 の第 7 実施形態では、X 軸に平行な主軸 5 0 A' を有するくさび板 5 0' が用いられている。

【0101】この実施形態によると、アッテネータユニ

ット A U 1 及び A U 2 における減衰の波長特性が同じ傾向を有するようになるので、図 1 0 の第 3 実施形態及び図 1 2 の第 5 実施形態における動作原理に準じて理解されるように、減衰の波長特性を自由に調節し得る光アッテネータであって減衰が入力ビームの偏光状態に依存しない偏光無依存の光アッテネータの提供が可能になる。

【0102】以上説明した実施形態では、複屈折結晶からなるくさび板の組み合わせにより偏光無依存の光アッテネータの提供を可能にしているが、複屈折結晶からなる平板の組み合わせにより偏光無依存の光アッテネータを提供することもできる。この場合には、くさび板の組み合わせによる場合には平行ビーム系を採用しているのに対して、収束ビーム系を採用するのが望ましい。

【0103】近年、低損失（例えば 0.2 dB/km）な光ファイバの製造技術及び使用技術が確立され、光ファイバを伝送路とする光通信システムが実用化されている。また、光ファイバにおける損失を補償して長距離の伝送を可能にするために、信号光を増幅するための光増幅器の使用が提案され或いは実用化されている。

【0104】光増幅器は、増幅されるべき信号光が供給される光増幅媒体と、光増幅媒体が信号光の波長を含む利得帯域を提供するように光増幅媒体をポンピング（励起）する手段とを備えている。例えば、エルビウムドープファイバ増幅器（E D F A）は、光増幅媒体としてのエルビウムドープファイバ（E D F）と、予め定められた波長を有するポンプ光を E D F に供給するためのポンプ光源とを備えている。 $0.98 \mu\text{m}$ 帯或いは $1.48 \mu\text{m}$ 帯の波長を有するポンプ光を用いることによって、波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯を含む利得帯域が得られる。また、半導体チップを光増幅媒体として用いる光増幅器も知られている。この場合、半導体チップに電流を注入することによってポンピングが行われる。

【0105】一方、光ファイバによる伝送容量を増大させるための技術として、波長分割多重（WDM）がある。WDM が適用されるシステムにおいては、異なる波長を有する複数の光キャリアが用いられる。各光キャリアを独立に変調することによって得られた複数の光信号が光マルチプレクサにより波長分割多重され、その結果得られた WDM 信号光が光ファイバ伝送路に送出される。受信側では、受けた WDM 信号光が光デマルチプレクサによって個々の光信号に分離され、各光信号に基づいて伝送データが再生される。従って、WDM を適用することによって、当該多重数に応じて一本の光ファイバにおける伝送容量を増大させることができる。

【0106】WDM が適用されるシステムに光増幅器を組み入れる場合、利得傾斜（ゲインチルト）或いは利得偏差で代表される利得の波長特性によって伝送距離が制限される。例えば、E D F A においては、波長 $1.55 \mu\text{m}$ の近傍で利得傾斜が生じ、この利得傾斜は E D F A への信号光のトータル入力パワー及びポンプ光のパワー

に従って変化することが知られている。

【0107】図17は本発明によるシステムの実施形態を示すブロック図である。このシステムは、互いに異なる波長を有する複数の光信号を含む波長分割多重光(WDM光)が伝送される光ファイバ伝送路68と、光ファイバ伝送路68の途中に設けられる本発明による光アッテネータ70とを備えている。光アッテネータ70は各々可変の減衰をWDM光に与えるためのアッテネータユニットAU1及びAU2を有している。アッテネータユニットAU1の減衰の第1の波長特性はアッテネータユニットAU2の減衰の第2の波長特性と異なる。ここでは、WDM光に含まれる複数の光信号の波長はそれぞれ $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ である。

【0108】光ファイバ伝送路68がインライン型の複数の光増幅器を含んでいる場合、もし、各光増幅器がWDM光の帯域において利得の波長特性を有しているとすると、その利得の波長特性が累積し、信号電力或いは信号対雑音比(光SNR)のチャンネル間偏差が生じてしまう。

【0109】図17の実施形態では、例えば光アッテネータ70を本発明の第2の側面に従って構成することによって、光アッテネータ70により与えられる減衰の波長特性を自由に調節することができるので、累積した利得の波長特性を補償して信号電力及び光SNRのチャンネル間偏差を小さくすることができる。

【0110】或いは、光ファイバ伝送路68における利得の波長特性がフラットになるように注意深く制御されているシステムにおいては、本発明の第1の側面に従って光アッテネータ70を構成することによって、光アッテネータユニットAU1及びAU2の各々において生じ得る減衰の波長特性を実質的に相殺させて、制御されているフラットな利得の波長特性を維持することができる。

【0111】図18の(A)、(B)及び(C)はそれぞれ本発明による光増幅器の実施形態を示すブロック図である。各光増幅器が図17のシステムに適用されるものとして各光増幅器の構成及び動作を説明する。

【0112】図18の(A)に示される実施形態では、光増幅器71は、2つの光増幅ユニット72(#1及び#2)と、これらの間に設けられる本発明による光アッテネータ70とを備えている。光アッテネータ70は各々可変の減衰を与えるためのアッテネータユニットAU1及びAU2を備えており、アッテネータユニットAU1の減衰の第1の波長特性はアッテネータユニットAU2の減衰の第2の波長特性と異なる。

【0113】増幅すべきWDM光は先ず光増幅ユニット72(#1)で増幅され、増幅されたWDM光に光アッテネータ70により減衰が与えられる。減衰されたWDM光は次いで光増幅ユニット72(#2)で増幅されてこの光増幅器71から出力される。

【0114】光増幅ユニット72(#1及び#2)の各々の利得の波長特性を維持すべきである場合には、第1及び第2の波長特性は互いに打ち消すように設定される。或いは、光増幅ユニット72(#2)から出力される光の波長特性(具体的にはWDM光のパワーの波長特性)がフラットになるように第1及び第2の波長特性が設定されてもよい。

【0115】図18の(B)に示される実施形態では、光増幅器70は光増幅ユニット72の出力に接続されている。この場合、光アッテネータ70の動作により光増幅ユニット72の利得の波長特性が変化しないように、第1及び第2の波長特性は互いに打ち消すように設定される。

【0116】図18の(C)に示される実施形態では、光アッテネータ70は光増幅ユニット72の入力に接続されている。この場合、光増幅ユニット72に供給される増幅すべきWDM光の波長特性が変化しないようにするために、例えば、第1及び第2の波長特性は互いに打ち消すように設定される。

【0117】尚、図18の(B)及び(C)の各々の実施形態において、光増幅器72において生じ得る利得の波長特性を打ち消すように第1及び第2の波長特性が設定されていてもよい。

【0118】図19は本発明による端局装置の実施形態を示すブロック図である。光ファイバ伝送路68の入力端には端局装置74が接続されている。端局装置74は、互いに異なる波長 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ を有する光信号をそれぞれ出力する複数のE/O(電気/光)変換器76(#1, ..., #n)と、これらの光信号のレベルを調整するための本発明による光アッテネータ70(#1, ..., #n)とを備えている。光アッテネータ70(#1, ..., #n)の各々は所謂レベル調整ユニットとして用いられている。

【0119】光アッテネータ70(#1, ..., #n)から出力された光信号は光マルチプレクサ78により波長分割多重され、その結果得られたWDM光は光増幅器71により増幅されて光ファイバ伝送路68に供給される。光増幅器71には、例えば、図18の(A)、(B)及び(C)の実施形態の各々を適用することができる。

【0120】E/O変換器76(#1, ..., #n)の各々は、CW光(連続波光)を出力するレーザダイオード(LD)80と、LD80から出力されたCW光を主信号に基づき変調するための光変調器82とを含む。

【0121】この実施形態によると、光アッテネータ70(#1, ..., #n)の各々において本発明の適用によって減衰の波長特性が実質的にフラットであり或いは所望の波長特性が得られているので、E/O変換器76(#1, ..., #n)の各々から出力された光信号のパワーの波長特性を維持することができ、得られるWDM光

におけるパワーの波長特性を一定に保つことができる。

【0 1 2 2】また、光増幅器 7 1 はその構成要素として本発明による光アッテネータ 7 0 を有しているので、得られる WDM 光におけるパワーの波長特性を平坦にし或いは所望の特性に設定することができる。

【0 1 2 3】尚、光アッテネータ 7 0 (# 1, ..., # n) を省略して端局装置 7 4 を構成してもよいし、光増幅器 7 1 を省略して端局装置 7 4 を構成してもよい。

【0 1 2 4】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によると、減衰の波長特性が平坦な光アッテネータ或いは減衰の波長特性を調節し得る光アッテネータの提供が可能になるという効果が生じる。

【0 1 2 5】また、本発明の特定の実施形態によると、減衰が入力ビームの偏光状態に依存しない偏光無依存の光アッテネータの提供が可能になる。さらに、本発明によると、本発明による光アッテネータを備えた新規なシステム、光増幅器及び端局装置の提供が可能になるという効果もある。

【図面の簡単な説明】

【図 1】図 1 は本発明による光アッテネータの第 1 実施形態を示す図である。

【図 2】図 2 は本発明に適用可能なファラデー回転子の実施形態を示す図である。

【図 3】図 3 は図 2 に示されるファラデー回転子で回転角が変化する原理を説明するための図である。

【図 4】図 4 は図 1 に示される 2 つのアッテネータユニットの各々における減衰と駆動電流との関係を示すグラフである。

【図 5】図 5 はファラデー回転角の波長特性の一例を示すグラフである。

【図 6】図 6 は図 1 に示される光アッテネータにおける各ファラデー回転角の波長特性の影響を説明するための図である。

【図 7】図 7 の (A) 及び (B) はそれぞれ図 1 に示される 2 つのアッテネータユニットにおける減衰の波長特性の変化を示す図である。

【図 8】図 8 は本発明に適用可能な制御回路の実施形態を示すブロック図である。

【図 9】図 9 は本発明による光アッテネータの第 2 実施形態を示す図である。

【図 1 0】図 1 0 は本発明による光アッテネータの第 3 実施形態を示す図である。

【図 1 1】図 1 1 は本発明による光アッテネータの第 4 実施形態を示す図である。

【図 1 2】図 1 2 は本発明による光アッテネータの第 5 実施形態を示す図である。

【図 1 3】図 1 3 は図 1 2 に示されるアッテネータユニットにおける減衰の波長特性の測定結果を示すグラフである。

【図 1 4】図 1 4 の (A) ~ (D) は図 1 2 に示される光アッテネータにおけるトータルの減衰の波長特性の測定結果を示す図である。

【図 1 5】図 1 5 は本発明による光アッテネータの第 6 実施形態を示す図である。

【図 1 6】図 1 6 は本発明による光アッテネータの第 7 実施形態を示す図である。

【図 1 7】図 1 7 は本発明によるシステムの実施形態を示すブロック図である。

【図 1 8】図 1 8 の (A), (B) 及び (C) は本発明による光増幅器の実施形態を示すブロック図である。

【図 1 9】図 1 9 は本発明による端局装置の実施形態を示すブロック図である。

【符号の説明】

OP 光路

AU1, AU2 アッテネータユニット

PU 偏光ユニット

FR ファラデー回転子

4, 6, 8, 10 偏光子

12 磁気光学結晶

14 永久磁石

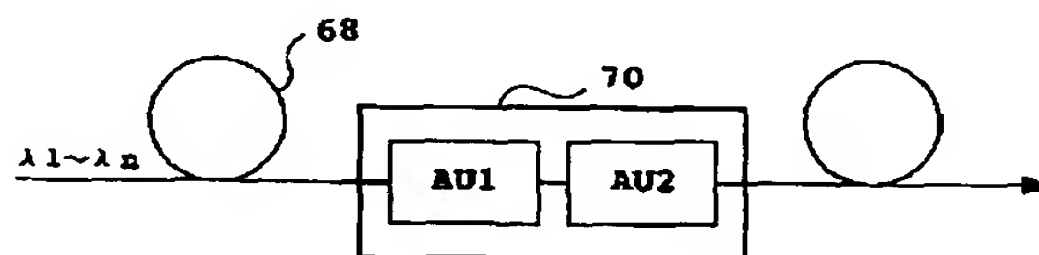
16 電磁石

20 可変電流源

44, 46, 48, 50 複屈折結晶からなるくさび板

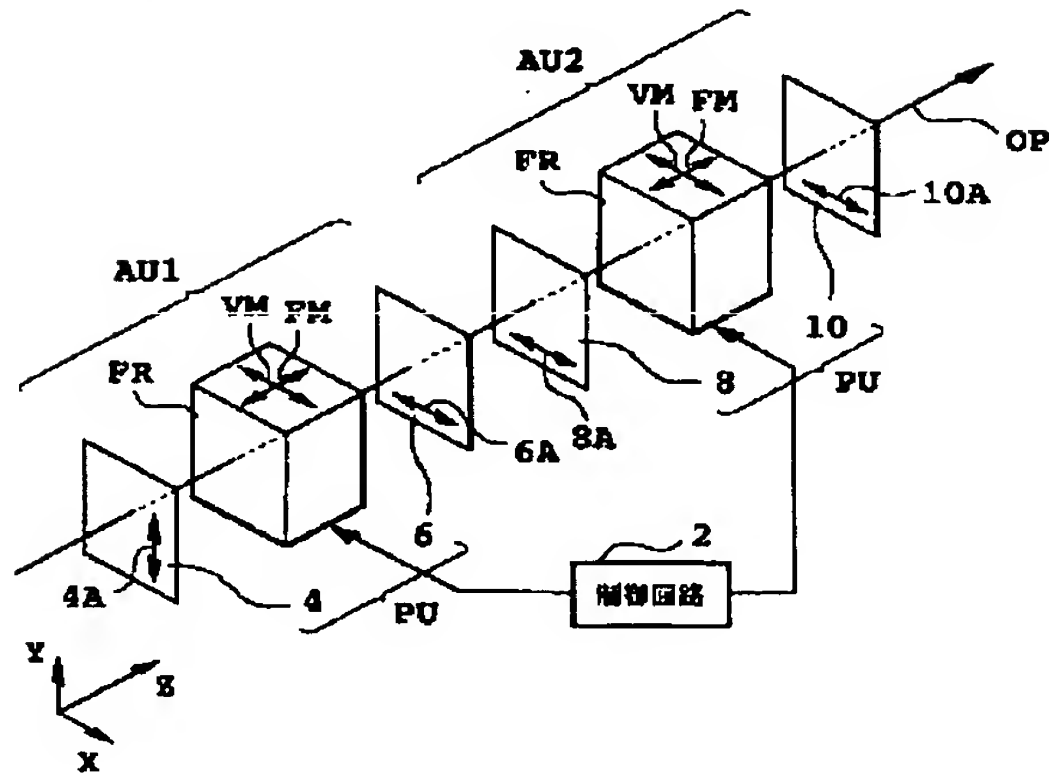
【図 1 7】

本発明によるシステムの実施形態を示すブロック図



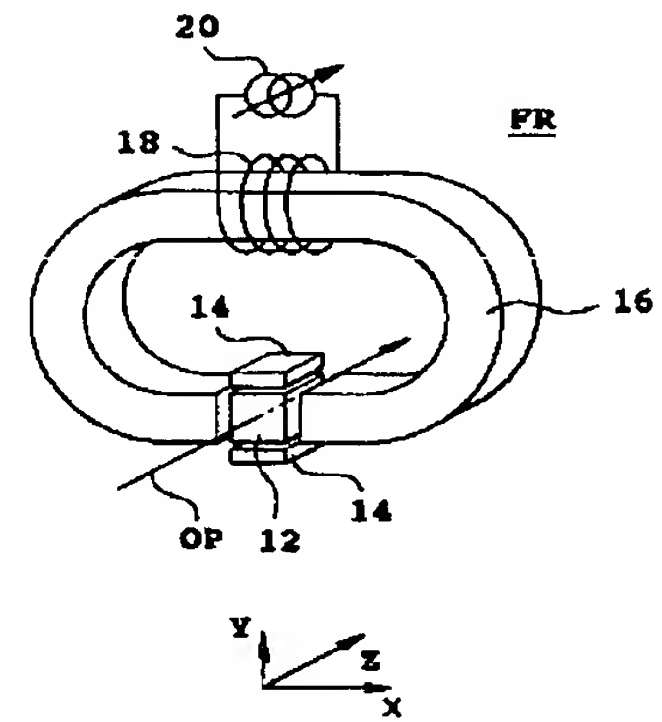
【図 1】

光アッテネータの第1実施形態を示す図

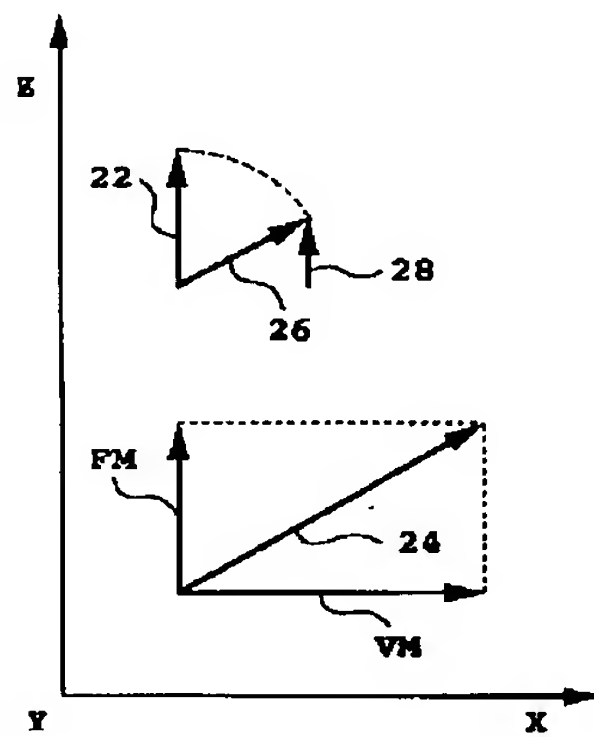


【図 2】

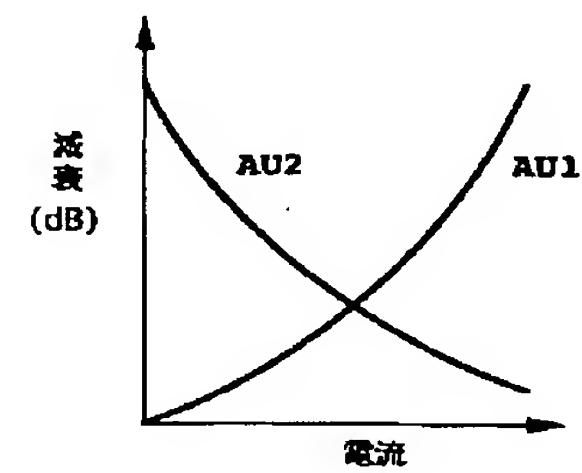
ファラデー回転子FRの実施形態を示す図



【図 3】

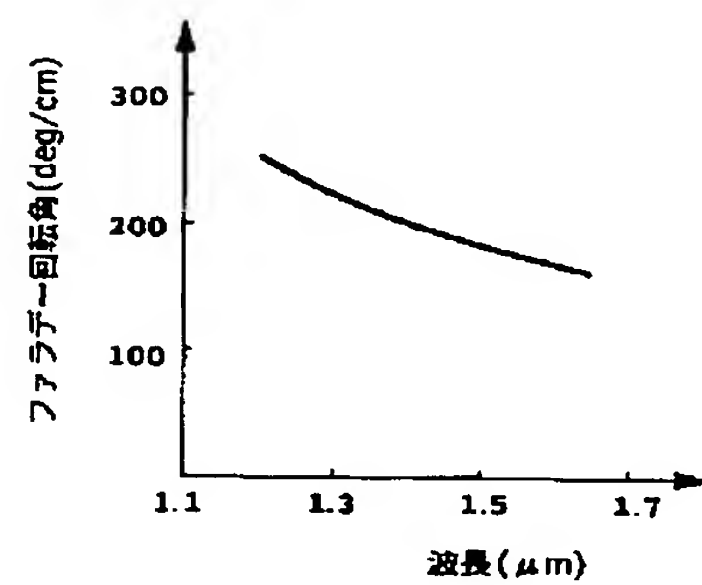
図2のファラデー回転子FRで
ファラデー回転角が変化する原理を説明するための図

【図 4】

図1のアッテネータユニットAU1及びAU2の
各々における減衰と駆動電流との関係を示すグラフ

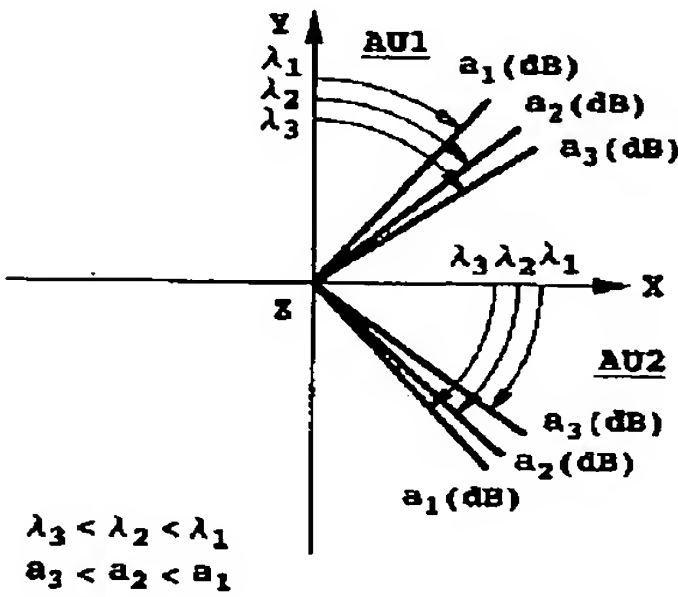
【図 5】

ファラデー回転角の波長特性の一例を示すグラフ



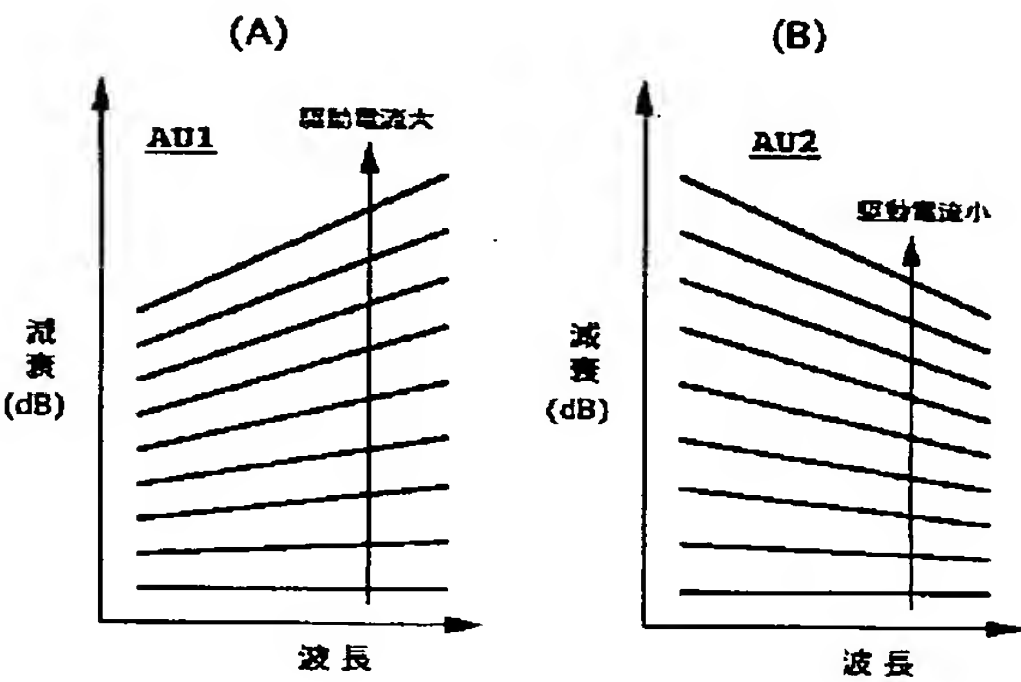
【図 6】

図1の光アッテネータにおける各ファラデー回転角の波長特性の影響を説明するための図



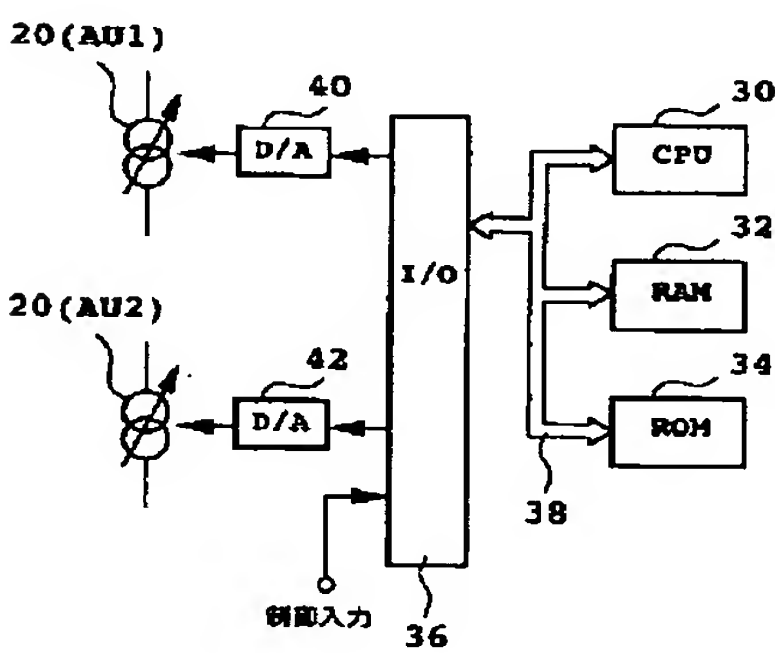
【図 7】

図1のアッテネータユニットAU1及びAU2における減衰の波長特性の変化を示す図



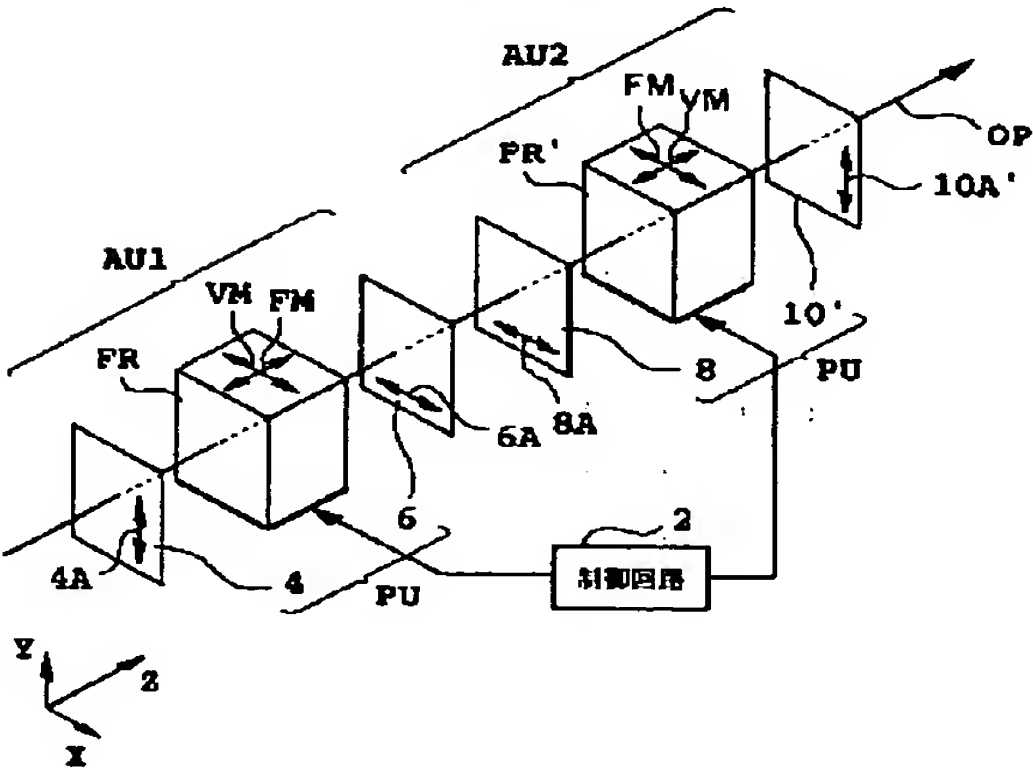
【図 8】

制御回路2の実施形態を示すブロック図



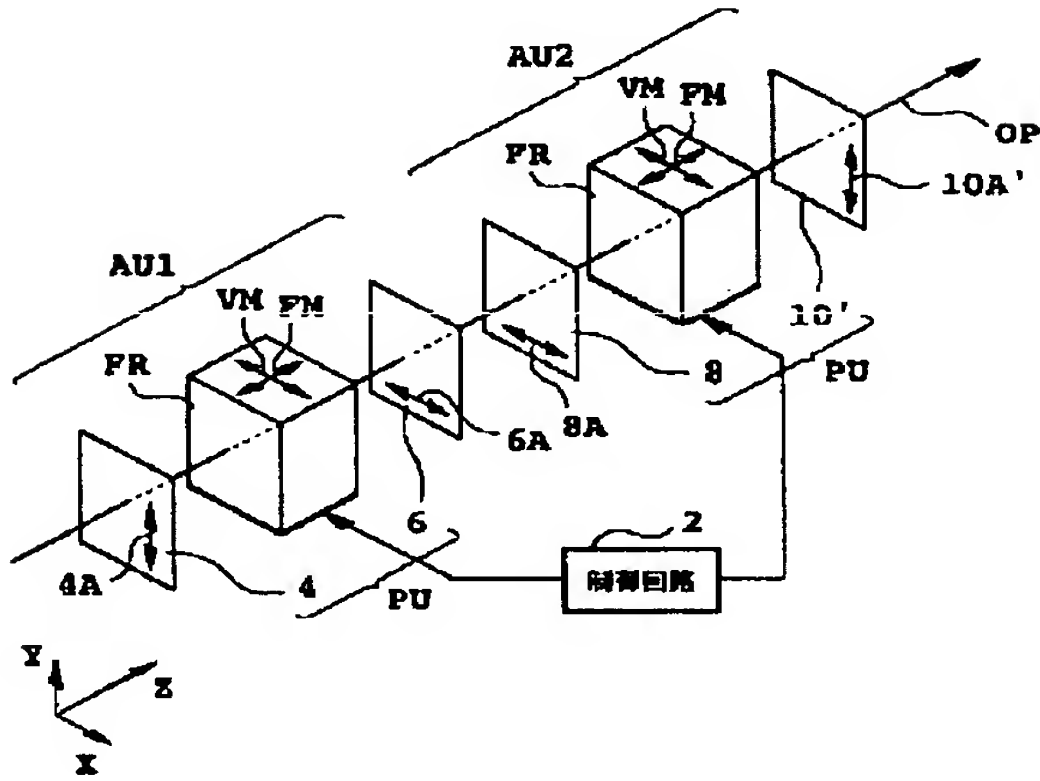
【図 9】

光アッテネータの第2実施形態を示す図



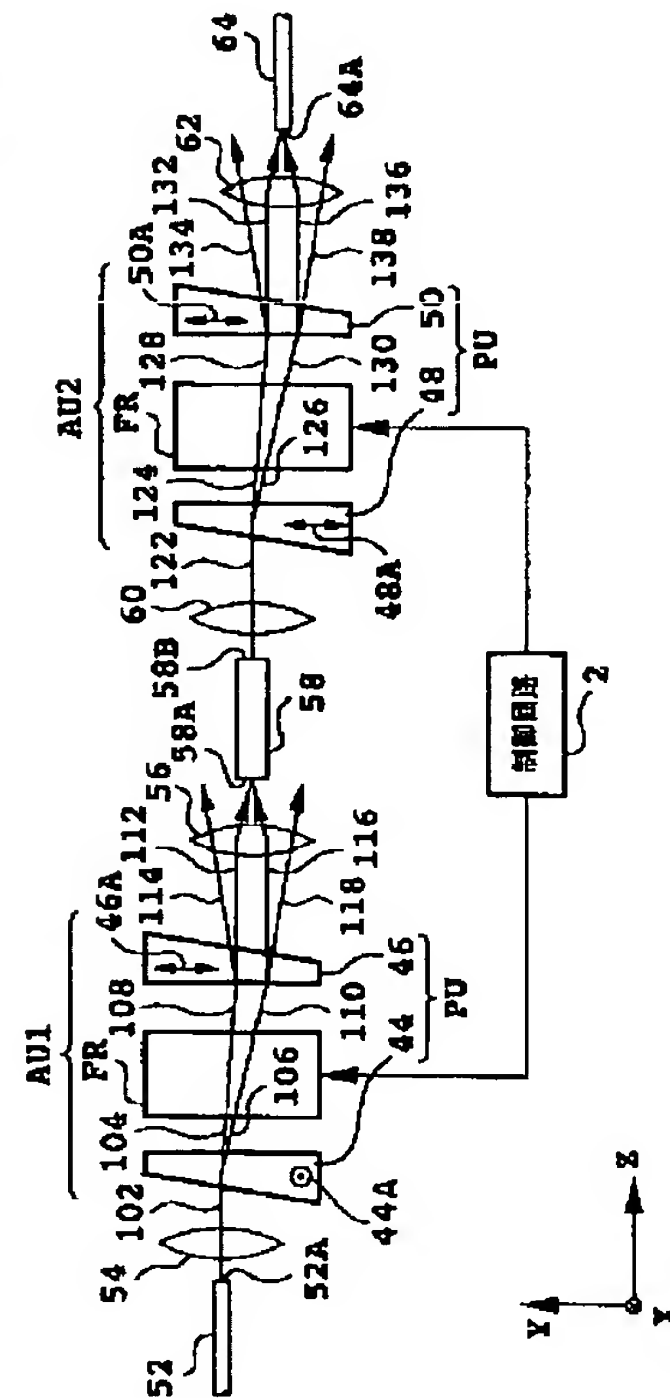
【図10】

光アッテネータの第3実施形態を示す図



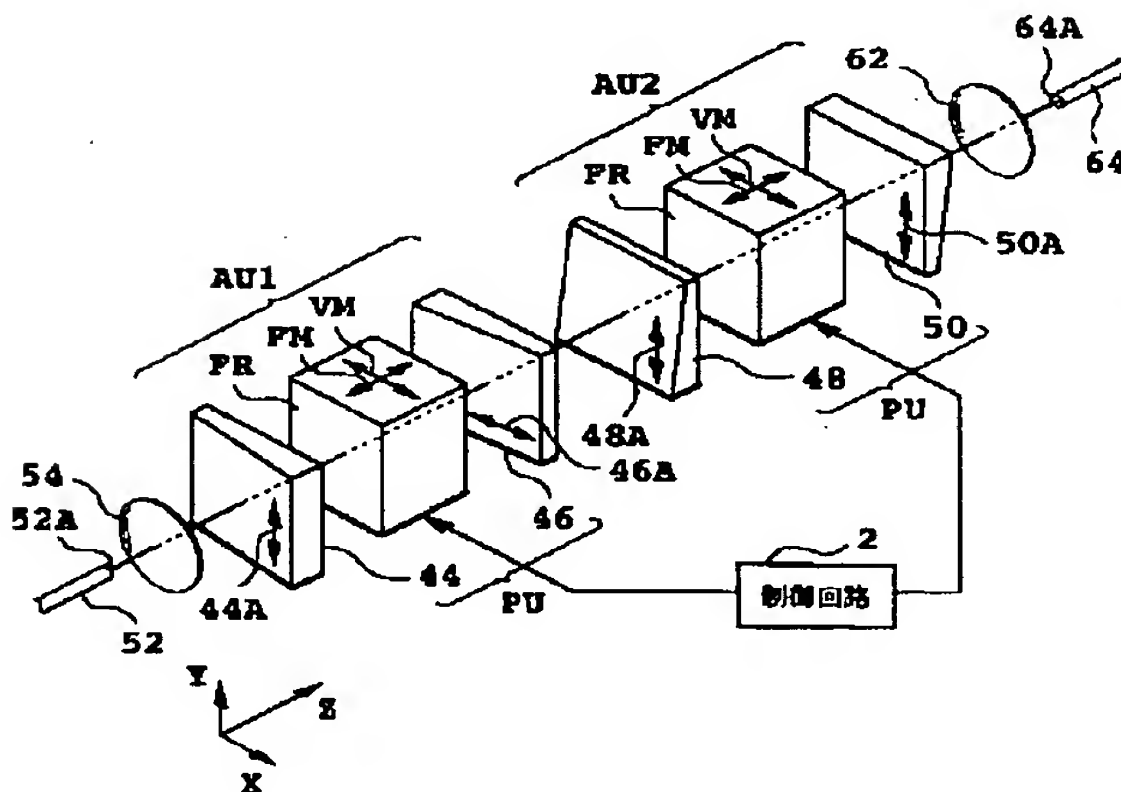
【図11】

光アッテネータの第4実施形態を示す図



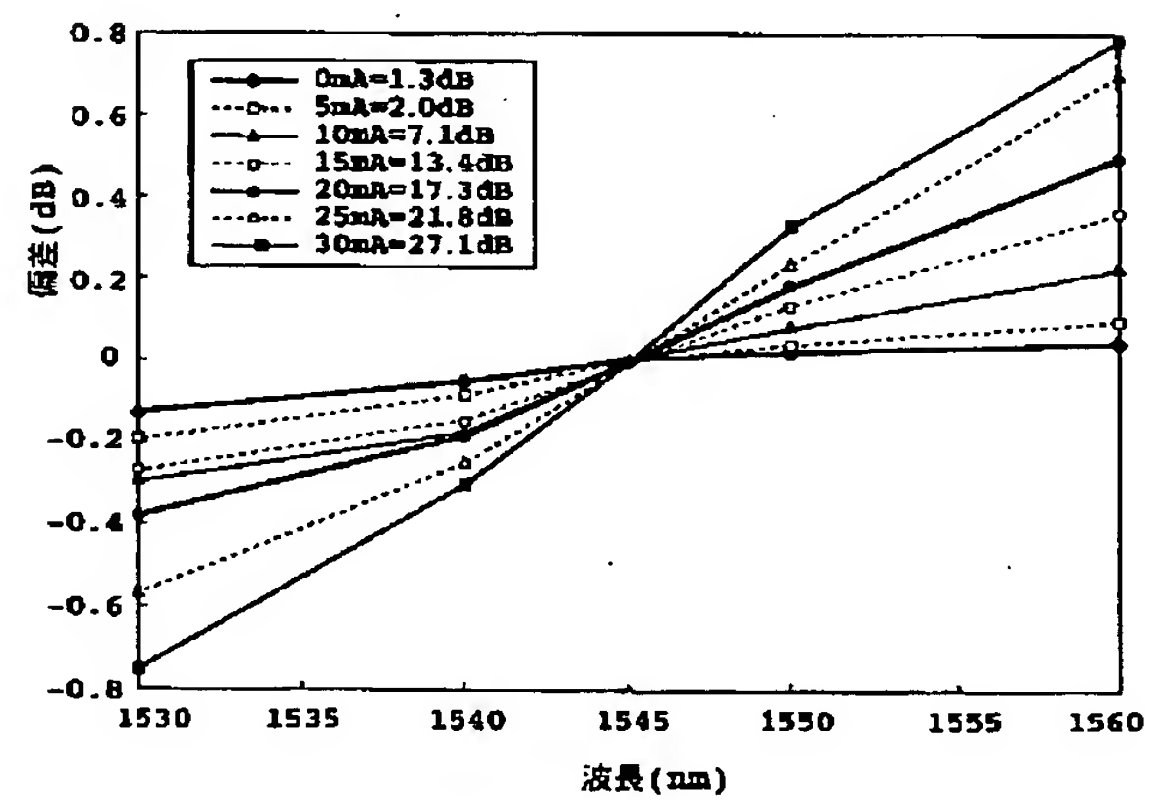
【図12】

光アッテネータの第5実施形態を示す図



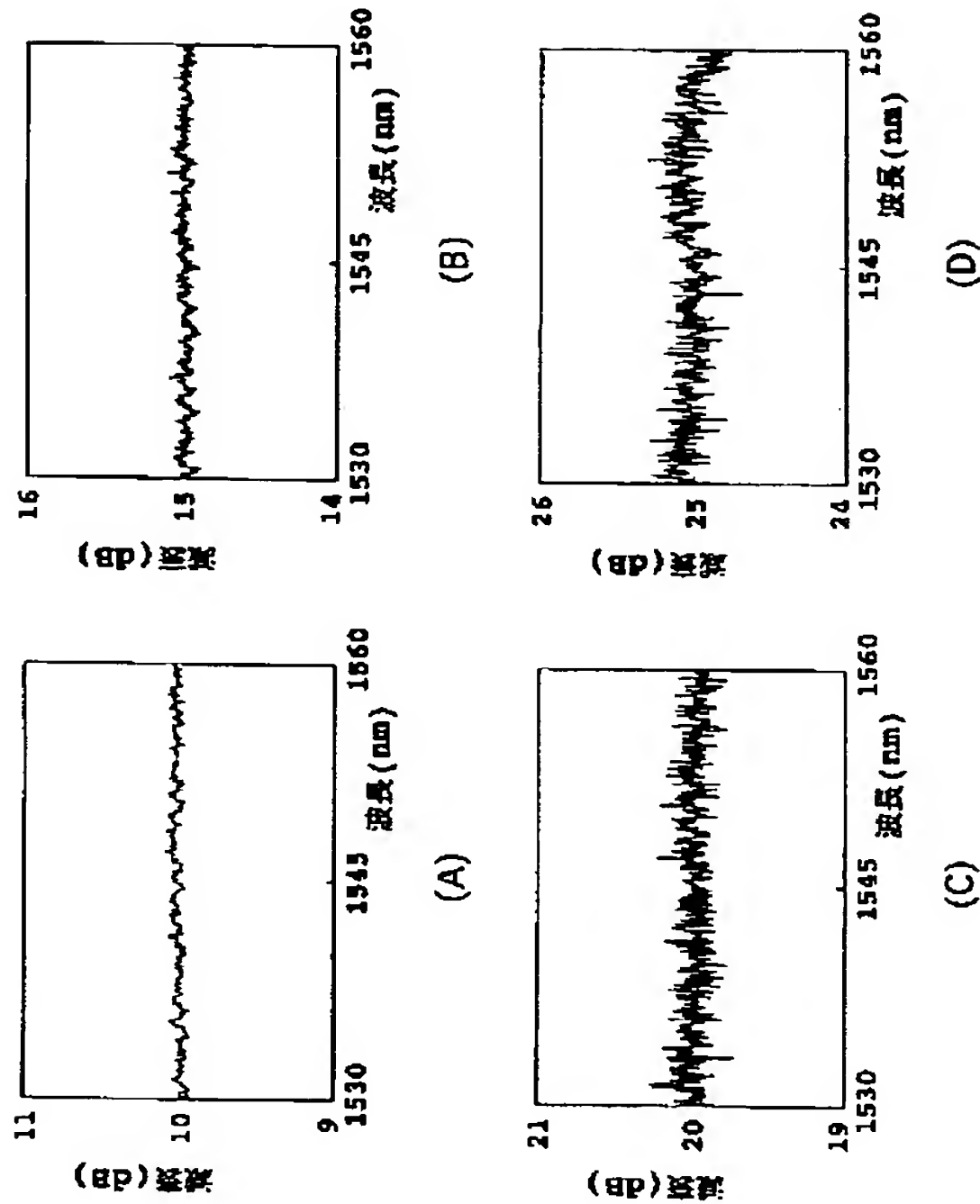
【図13】

図12のアッテネータユニットAU1における減衰の波長特性の測定結果を示すグラフ



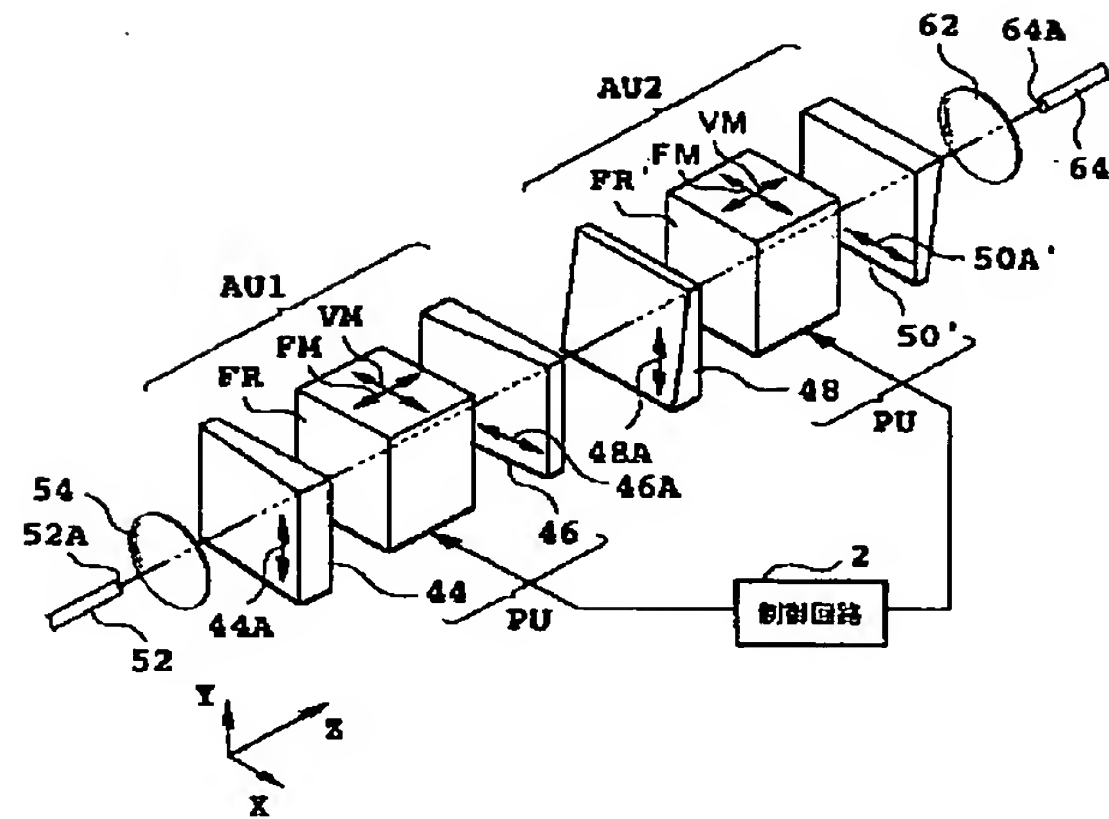
【図14】

図12の光アッテネータにおける
トータル減衰の波長特性の測定結果を示すグラフ



【図15】

光アッテネータの第6実施形態を示す図

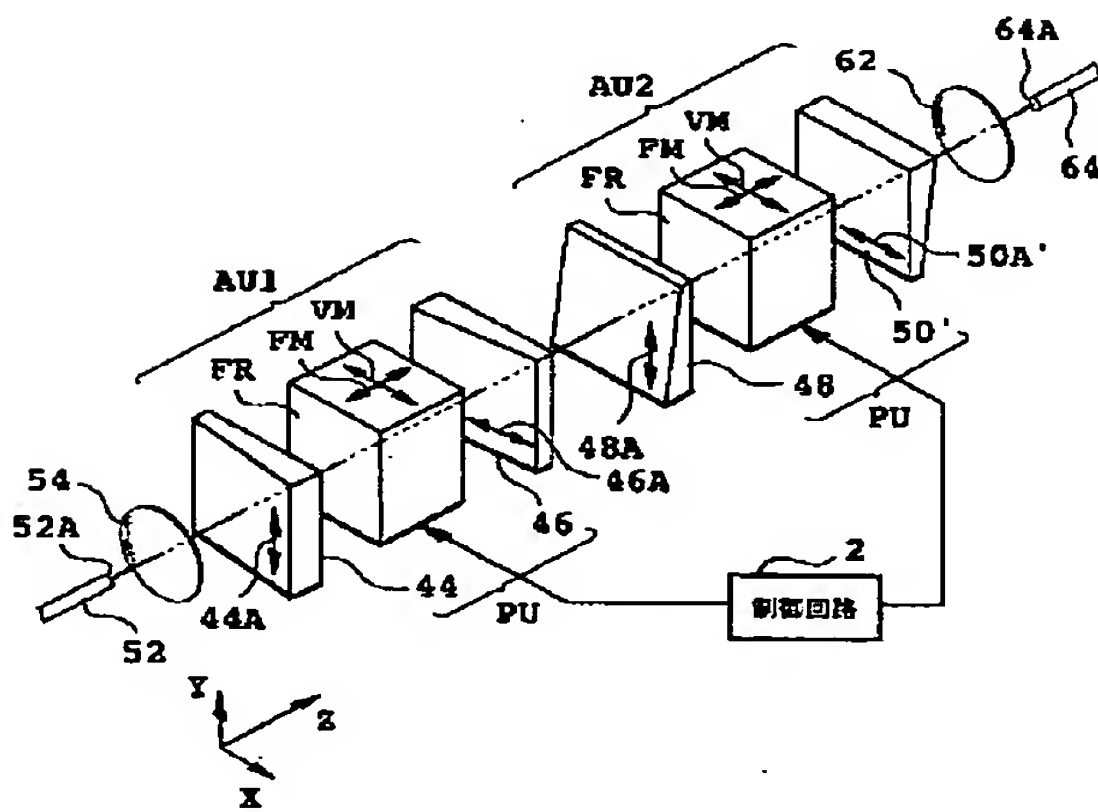


【図18】

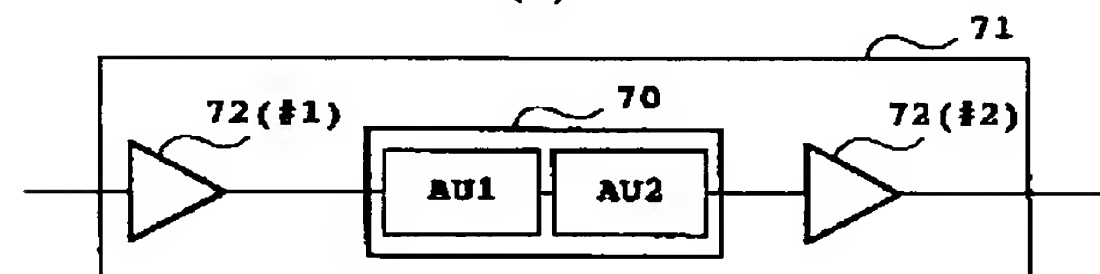
本発明による光増幅器の実施形態を示すブロック図

【図16】

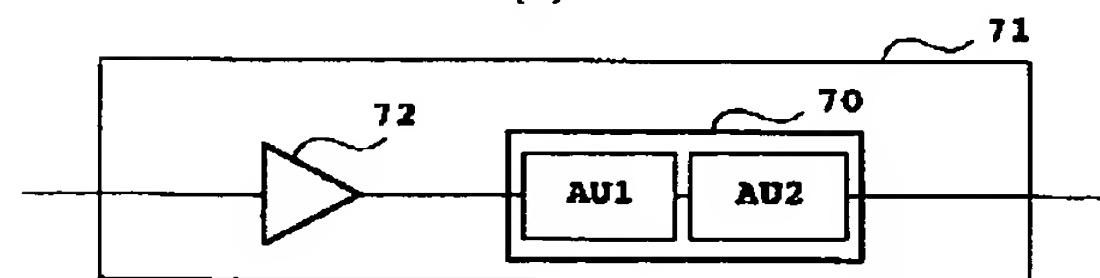
光アッテネータの第7実施形態を示す図



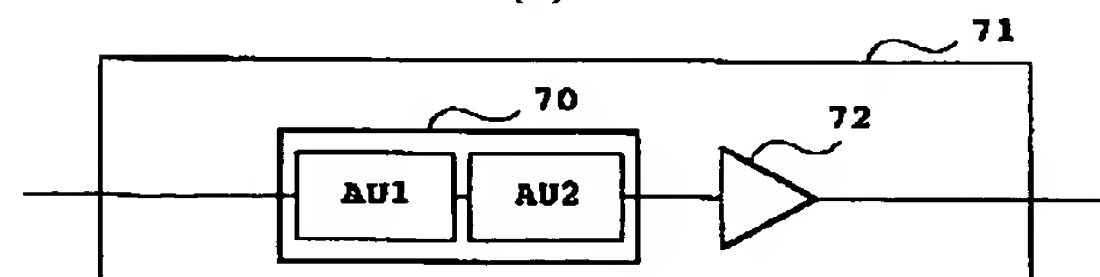
(A)



(B)



(C)



【図 1 9】

本発明による端局装置の実施形態を示すブロック図

